

TESIS DOCTORAL

**EFFECTO DE LAS CONDICIONES DEL PROCESO DE LA FRITURA POR
INMERSIÓN DE RODAJAS PLÁTANO VARIEDAD Dominico Hartón (*Musa*
AAB), SOBRE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y
MASA, Y LA CALIDAD FISICOQUÍMICA DEL PRODUCTO**

PRESENTADA POR
FRANCISCO JAVIER CASTELLANOS GALEANO
Ingeniero Químico
Especialista en Ciencia y Tecnología de Alimentos
Especialista en Docencia Universitaria

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
DOCTORADO EN INGENIERIA
ÉNFASIS INGENIERIA DE ALIMENTOS
CALI –2012

**EFFECTO DE LAS CONDICIONES DEL PROCESO DE LA FRITURA POR
INMERSIÓN DE RODAJAS PLÁTANO VARIEDAD Dominico Hartón (*Musa*
AAB), SOBRE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y
MASA, Y LA CALIDAD FISICOQUÍMICA DEL PRODUCTO**

**Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de
Doctor en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de alimentos**

DIRECTORA

CLAUDIA ISABEL OCHOA MARTINEZ

Doctora en Ingeniería

CO-DIRECTOR

CARLOS ANTONIO VELEZ PASOS

Doctor en Ingeniería

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERIA

DOCTORADO EN INGENIERIA

ÉNFASIS INGENIERIA DE ALIMENTOS

CALI – 2012

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS	9
NOMENCLATURA	11
RESUMEN	14
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	20
1. REVISION BIBLIOGRAFICA	21
1.1. MATERIA PRIMA Y BIODIVERSIDAD	21
1.2. FRITURA POR INMERSIÓN	25
1.2.1 FRITURA POR INMERSION A PRESION ATMOSFERICA	27
1.2.2. FRITURA POR INMERSIÓN A PRESIÓN DE VACÍO	29
1.2.3. FENÓMENOS DE TRANSPORTE EN LA FRITURA POR INMERSIÓN	34
1.2.3.1. Soluciones numéricas, analíticas y empíricas	36
1.3 CALIDAD DE LOS PRODUCTOS FRITOS	46
1.3.1. COLOR	46
1.3.2 TEXTURA	49
2. MATERIALES Y MÉTODOS	52
2.1. MATERIA PRIMA Y MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN	52
2.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA	52
2.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MATERIA SECA	53
2.1.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	53
2.2. FRITURA POR INMERSIÓN	54
2.2.1. MATERIALES Y EQUIPOS	54
2.2.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DE FRITURA	55
2.2.2.1. Consideración especial	56

2.2.3. MODELADO DE LOS FENÓMENOS DE TRANSPORTE Y DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD EN LA FRITURA POR INMERSIÓN	58
2.2.3.1. Modelado de la transferencia de calor	58
2.2.3.2. Modelado de la transferencia de humedad	58
2.2.3.3. Modelado de la ganancia de aceite	58
2.2.3.4 Diseño experimental	59
2.2.4. CORRELACION DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD CON LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN	60
2.2.4.1. Determinación del contenido de humedad	60
2.2.4.2. Determinación del contenido de grasa	60
2.2.4.3. Color	60
2.2.4.4. Textura	60
2.2.4.5. Análisis estadístico. Superficie de respuesta	61
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	63
3.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA	63
3.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MATERIA SECA	69
3.2. MODELADO DE LOS FENÓMENOS DE TRANSPORTE Y DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD EN LA FRITURA POR INMERSIÓN	74
3.2.1. TRANSFERENCIA DE CALOR	74
3.2.2. TRANSFERENCIA DE HUMEDAD	76
3.2.2.1. Validación del modelo	78
3.2.3. ABSORCIÓN DE ACEITE DURANTE LA FRITURA	79
3.2.4. TEXTURA (FRAGILIDAD)	81
3.2.5. COLOR	83
3.3. CORRELACION DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD CON LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN	88
4. CONCLUSIONES	96
5. BIBLIOGRAFÍA	98
6. ANEXOS	103
6.1 ANEXO 1.	103
INFORMACIÓN GENERAL DE LAS VARIEDADES ESTUDIADAS	103

6.2. ANEXO 2.	104
CONDICIONES DE COSECHA PARA LAS VARIEDADES DE PLÁTANO, África, Dominico Hartón, FHIA 20 y FHIA 21.	104
6.3. ANEXO 3.	105
PROTOCOLOS PARA LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y REOLÓGICA DE LAS VARIEDADES DE PLÁTANO	105
CARACTERIZACIÓN FÍSICA	105
Principio	105
Materiales y Equipos	105
Método	105
Cálculos	107
ELABORACIÓN DE HARINAS Y EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN	108
Principio	108
Materiales Y Equipo.	108
Método. Obtención de harinas de plátano	108
Método. Obtención de Almidón de plátano	109
CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS HARINAS DE PLÁTANO	109
Determinación del Porcentaje de Materia Seca.	109
Principio	109
Materiales y equipos	110
Cálculo.	110
Determinación del Contenido de Azúcares	110
Principio.	110
Método	111
Cálculo.	112
Determinación Enzimática del Contenido de Almidón.	112
Principio.	112
Materiales, equipos y reactivos.	112
Reactivos	113
Método.	113
Cálculos.	114

6.4. ANEXO 4.	115
TAMAÑOS DE MUESTRA	115
Caracterización física	115
Contenido de Humedad	116
Contenido de Aceite	116
Textura: Fragilidad.	117
6.5. ANEXO 5.	118
VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL PROTOCOLO DE TEXTURA	118
6.6. ANEXO 6.	119
FOTOGRAFÍAS DE LOS RACIMOS DE LAS VARIEDADES DE PLÁTANO	119
6.7. Anexo 7	120
FOTOGRAFÍAS DE LAS MANOS, DEDOS Y CORTE TRANSVERSAL LAS VARIEDADES DE PLÁTANO ESTUDIADAS	120
6.8. ANEXO 8	121
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR.	121
6.9. ANEXO 9	123
VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL MODELAMIENTO DE TRANSFERENCIA DE AGUA.	123
Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$.	123
Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$	124
6.10. ANEXO 10	126
VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL MODELAMIENTO DE LA ABSORCIÓN DE ACEITE.	126
Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$	126
Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$	127

6.11. ANEXO 11	129
VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL MODELAMIENTO DE LA TEXTURA: FRAGILIDAD.	129
Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$	129
Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$	130
6.12. ANEXO 12	132
VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL MODELAMIENTO DE LAS COORDENADAS DE COLOR	132
Coordenada de color L^*.	132
Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$	132
Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$	133
Coordenada de color a^*.	135
Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$	135
Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$	136
Coordenada de color b^*.	138
Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$	138
Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$	139
6.13. ANEXO 13	141
VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS SUPERFICIES DE RESPUESTA.	141
Optimización general	146

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Producción anual de plátano en los primeros 20 países a nivel mundial</i>	21
<i>Tabla 2. Principales países productores de plátano a nivel mundial en el año 2010</i>	21
<i>Tabla 3. Principales departamentos productores de plátano a nivel nacional, 2009</i>	22
<i>Tabla 4. Composición bromatológica de algunas variedades de plátano en estado verde</i>	25
<i>Tabla 5. Contenidos de aceite en alimentos fritos a presión atmosférica</i>	29
<i>Tabla 6. Condiciones de operación y variables respuesta para la fritura por inmersión a presión de vacío</i>	32
<i>Tabla 7. Coeficientes de transferencia de calor en fritura por inmersión (h)</i>	42
<i>Tabla 8. Difusividad másica en fritura por inmersión a presión atmosférica</i>	45
<i>Tabla 9. Fuerza de quiebre en productos fritos al vacío</i>	51
<i>Tabla 11. Fuerza térmica equivalente a 97 kPa (condición atmosférica)</i>	56
<i>Tabla 12. Temperatura del aceite para cada presión absoluta definida</i>	57
<i>Tabla 13. Condiciones de proceso</i>	59
<i>Tabla 14. Factores y sus intervalos de confianza</i>	61
<i>Tabla 15. Diseño central compuesto rotatable para tres factores</i>	62
<i>Tabla 16. Matriz de componentes principales aplicada en la caracterización física de plátanos</i>	68
<i>Tabla 17. Estadística descriptiva de la caracterización química</i>	70
<i>Tabla 18. Matriz de componentes principales para las variables químicas</i>	71
<i>Tabla 19. Coeficientes convectivos de transferencia de calor promedio</i>	75
<i>Tabla 20. Tiempo de fritura necesario para alcanzar una humedad adimensional menor de 0.01</i>	77
<i>Tabla 21. Difusividad efectiva a distintas condiciones de proceso</i>	78
<i>Tabla 22. Comparación del contenido de aceite en equilibrio</i>	81
<i>Tabla 23. Síntesis de la validación estadística para las coordenadas de color</i>	84
<i>Tabla 24. Análisis de ajuste del modelo</i>	89

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Representación espacial del parámetro color</i>	47
<i>Figura 2. Comparación de variedades de acuerdo al peso</i>	64
<i>Figura 3. Comparación de variedades de acuerdo al número de dedos</i>	64
<i>Figura 4. Propiedades físicas de los plátanos pelados</i>	66
<i>Figura 5. Contenido de cáscara en las variedades de plátano en estudio</i>	67
<i>Figura 6. Análisis multivariado de las características físicas de plátanos</i>	69
<i>Figura 7. Contenido de materia seca de acuerdo a la variedad</i>	71
<i>Figura 8. Análisis multivariado de las características químicas y de la materia seca</i>	72
<i>Figura 9. Comportamiento de la temperatura del aceite (línea negra) y del producto (línea roja) durante la fritura</i>	74
<i>Figura 10. Variación de la humedad adimensional de las placas circulares de plátano con el tiempo (s) para dos fuerzas térmicas y tres presiones absolutas. (Puntos son datos experimentales y líneas corresponden al modelo difusional).</i>	76
<i>Figura 11. Validación del modelo difusional en la fritura de rodajas de plátano</i>	79
<i>Figura 12. Variación del contenido de aceite de trozos de plátano con el tiempo, para dos fuerzas térmicas equivalentes y una presión absoluta. (Los puntos son los datos experimentales y las líneas son obtenidas con el modelo).</i>	80
<i>Figura 13. Efecto de las condiciones de fritura sobre la fragilidad de la muestra. La línea central continua corresponde a la predicción del modelo, las dos líneas siguientes pertenecen al intervalo de 95% de confianza, las dos líneas claras siguientes corresponden al intervalo de 95% confianza donde se encontrarían nuevas observaciones</i>	82
<i>Figura 14. Variación de la coordenada de color L^* de las tajadas fritas de plátano con el tiempo (s). (Puntos son datos experimentales y las líneas continuas corresponden a la predicción del modelo, la línea punteada al intervalo de 95% de confianza del valor obtenido por la curva, la línea clara al intervalo de 95% de confianza confianza donde se encontrarían nuevas observaciones)</i>	85
<i>Figura 15. Variación de la coordenada de color a^* de las tajadas fritas de plátano con el tiempo (s) (Puntos son datos experimentales y las líneas continuas corresponden a la predicción del modelo, la línea punteada al intervalo de 95% de confianza del valor obtenido por la curva, la línea clara al intervalo de 95% de confianza confianza donde se encontrarían nuevas observaciones)</i>	86
<i>Figura 16. Variación de la coordenada de color b^* de las tajadas fritas de plátano con el tiempo (s) (Puntos son datos experimentales y las líneas continuas corresponden a la predicción del modelo, la línea punteada al intervalo de 95% de confianza del valor obtenido por la curva, la línea clara al intervalo de 95% de confianza confianza donde se encontrarían nuevas observaciones)</i>	87

Figura 17. Superficies de respuesta y cortes para los contenidos de humedad y de aceite. a) Superficie de respuesta, b) P constante, c) ΔT constante, d) t constante _____	91
Figura 18. Superficies de respuesta y cortes para las coordenadas de color L^* , b^* y a^* . a) Superficie de respuesta, b) P constante, c) ΔT constante, d) t constante _____	93
Figura 19. Superficie de respuesta y cortes para la textura (fragilidad). a) Superficie de respuesta, b) P constante, c) ΔT constante, d) t constante _____	94

NOMENCLATURA

CARACTER	SIGNIFICADO
A	Área superficial (m^2)
a^*_{*j}	Coordenada de color de verde a rojo del material crudo
a^*_{*i}	Coordenada de color de verde a rojo del producto frito
b^*_{*j}	Coordenada de color de azul a amarillo del material crudo
b^*_{*i}	Coordenada de color de azul a amarillo del producto frito
Bi	Número de Biot, adimensional
Cp	Calor específico (kJ/kg K)
C_A	Concentración del componente A
C_{A0}	Concentración inicial del componente A
C_{AL}	Concentración del componente A en la superficie
$C_{A\infty}$	Concentración de A en el medio de calentamiento
D_0	Coeficiente de difusión efectivo
E_a	Energía de activación
h	Coeficiente convectivo de transferencia de calor (W/m^2K)
k_c	Coeficiente conductivo de transferencia de masa (W/mK)
k'	Constante de relación de absorción de aceite (min^{-1}).
L	Semi-espesor en una geometría plana (m)
L^*_{*j}	Coordenada de color de brillo del material crudo
L^*_{*i}	Coordenada de color de brillo del producto frito
m	Masa (kg)
M_{∞}	Masa de A en el medio de calentamiento
M_t	Masa de A en el tiempo t
M_i	Masa de A en el tiempo cero
$M_f(t)$	Cantidad de aceite ($kg\ kg^{-1}\ bs$) al tiempo t (s)
R	Constante universal de los gases (8.314 J/mol K)

r	Número de repeticiones del experimento
T_{aceite}	Temperatura del aceite (°C)
$T_{ebullición}$	Temperatura de ebullición del agua a la presión respectiva (°C)
T_s	Temperatura superficial (°C)
T	Temperatura absoluta (K)
$T(t)$	Temperatura en el tiempo t (°C)
t	Tiempo (s)
$T(x,t)$	Temperatura en cualquier punto del eje x para cualquier tiempo t
T_i	Temperatura inicial (°C)
T_{∞}	Temperatura del medio de calentamiento
T_S	Temperatura de la superficie del alimento (°C)
V	Volumen total
x	Dimensión cartesiana en el eje x
$\frac{dm}{dt}$	Velocidad de secado o deshidratación
$(\frac{\partial T}{\partial x})_{x=0}$	Distribución de temperatura a lo largo del eje x en x=0
$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$	Segunda derivada parcial de la temperatura en función de la posición
$\frac{dW}{dt}$	Variación del peso del alimento en función del tiempo
$\frac{\partial T}{\partial t}$	Variación de temperaturas en función del tiempo
$(\frac{\partial C}{\partial x})_{x=0}$	Primera derivada parcial de la concentración en función de la posición en x = 0
$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$	Segunda derivada parcial de la concentración en función de la posición
$\frac{\partial C}{\partial t}$	Distribución de concentraciones en función del tiempo

ΔE	Diferencia de color total
ΔT	Fuerza térmica equivalente (°C)
<i>Letras griegas</i>	
σ	Desviación estándar
β_n	Raíz de la ecuación
δ	Diferencia verdadera que se desea detectar
α	Difusividad térmica (m ² /s)
λ	Calor latente de vaporización del agua (2257 kJ/kg a 100°C)
Ψ	Concentración adimensional
ρ	Densidad aparente del objeto

RESUMEN

El consumo de productos fritos como aperitivos, aumenta a medida que se incrementa la oferta comercial. Al igual que aumenta el consumo, crece la preocupación por la calidad nutricional de los chips, lo que motiva la investigación y desarrollo de nuevos productos de aperitivo que aporten menos calorías y grasas a la dieta, al igual que buen sabor y facilidad de consumo. El siguiente trabajo de investigación seleccionó, entre cuatro musáceas sembradas en el centro – occidente de Colombia, la variedad que debe someterse al proceso de fritura por inmersión, para ello, se realizó una caracterización física y química a las variedades en mención, luego se analizó el comportamiento de rodajas de plátano (*Musa s.p.p. AAB*) en estado de madurez verde, en el procesos de fritura por inmersión a distintas condiciones de proceso (tiempo, fuerza térmica y presión), determinando el efecto de estos tratamientos sobre los fenómenos de transporte de calor y masa, además, de parámetros de calidad en productos fritos. Para ello se realizaron frituras variando el tiempo de proceso de 15 segundos a 600 segundos, la presión del sistema de 30 kPa a 91 kPa y fuerza térmica equivalente entre 43 °C y 73 °C. A las rodajas de plátano frito se les determinaron los siguientes parámetros de calidad, color, textura, humedad y contenido graso, con estos resultados se determinaron los coeficientes de convección de calor y la difusividad másica, además, se realizó un proceso de optimización estadística.

Los resultados mostraron la variable Dominico Hartón fue la que presentó mayor homogeneidad desde la primera hasta la última mano (gajas), en lo que se refiere al análisis de las variables físicas y químicas. Adicionalmente, el coeficiente convectivo de transferencia de calor y la difusividad másica no mostraron significancia para presiones bajas. De igual forma, el proceso de optimización mostró a la coordenada de color b^* como el único parámetro de calidad que mostró un máximo en el rango de estudio, además, la combinación de variables de entrada que optimizó el programa arrojó como resultado valores de fuerza térmica

baja (57 °C), presiones cercanas a la atmosférica (70 kPa) y tiempo alrededor de 6 minutos. El contenido de aceite se favoreció dando como resultado valores cercanos a 20 % para las condiciones de proceso optimizadas, adicionalmente, la temperatura del aceite se pudo disminuir hasta 140 °C sin afectar la calidad de las rodajas de plátano en comparación con temperaturas de aceite de 165 °C y condiciones atmosféricas.

Palabras claves: biodiversidad, propiedades físicas, humedad, FHIA y Dominico Hartón, contenido de aceite, contenido de humedad, color, textura, fritura al vacío, plátano.

ABSTRACT

The consumption of fried products such as snacks, increases as we increase the commercial offer. As consumption increases, there is growing concern about the nutritional quality of chips, what motivates research and development of new snack foods that provide fewer calories and fats to the diet, as well as good taste and ease of consumption. The following research work you selected, between four different varieties planted in the center - the west of Colombia, the variety that must undergo the process of frying by immersion, for thus conducted a physical and chemical characterization to the varieties mentioned, then analyze the behavior of slices of banana (*Musa s.p.p. AAB*) in a mature state green, in the process of frying by immersion to different process conditions (time, force and pressure thermal), determining the effect of these treatments on the phenomena of transport of heat and mass, in addition to quality parameters in fried products. To do this were fried by varying the process time for 15 seconds to 600 seconds, the system pressure of 30 kPa at 91 kPa and thermal force equivalent between 43 °C and 73°C. To the slices of fried bananas were determined the following parameters of quality, color, texture, moisture and fat content, according to these results, we identified the coefficients of convection of heat and thermal diffusivity Masica, furthermore, there was a statistical optimization process.

The results showed variable Dominico Harton was presented greater homogeneity from the first until the last hand (gajas), in regard to the analysis of the physical and chemical variables. In addition, the coefficient of convective heat transfer and thermal diffusivity Masica showed no significance for low pressures. Similarly, the optimization process showed to the y coordinate of b * color as the only parameter of quality which showed a peak in the range of study, in addition, the combination of input variables that optimized the program resulted in force values low thermal (57 °C), pressures near to atmospheric (70 kPa) and time around 6 minutes. The oil content favored resulting values close to 20 per cent for the optimized process

conditions, additionally, the temperature of the oil was able to decrease up to 140°C without affecting the quality of the banana slices in comparison with oil temperatures of 165 °C and atmospheric conditions.

Key Words: biodiversity, physical properties, moisture, FHIA and Dominico Harton, oil content, moisture content, color, texture, the vacuum frying, plantain.

INTRODUCCIÓN

La fritura por inmersión es uno de los métodos de cocción de alimentos más antiguos y simples. Este proceso consiste en un tratamiento térmico mediante el cual un producto alimenticio se sumerge en aceite o grasa alimenticia a temperaturas que se encuentran por encima del punto de ebullición del agua por un tiempo determinado. La fritura es una operación de deshidratación en la cual interaccionan los fenómenos de transferencia de calor y transferencia de masa, (ingreso de aceite y salida de agua simultáneamente) (Ngadi et al., 2009).

La fritura por inmersión se utiliza en la cocción de muchos tipos de alimentos de origen cárnico o vegetal. De hecho, la papa es el alimento que más se asocia con procesos de fritura por inmersión. La fritura por inmersión se usa ampliamente en la industria de alimentos, debido a que mejora la palatabilidad de los productos, suministrándoles características organolépticas deseables con relación al sabor y aroma (flavor), textura (crujencia) y apariencia (color, forma y brillo) (Dana y Saguy, 2006).

Cada vez más, los consumidores exigen productos fritos que presenten aspectos de nutrición y salud, baja cantidad y alta calidad en el aceite que queda dentro del alimento, ya que el consumo de grasas saturadas es un factor de incremento de enfermedades coronarias. Un mejor entendimiento del proceso de fritura por inmersión ayudaría a mejorar los parámetros de calidad de los productos fritos (punto de quiebre y flavor) y reduciría los contenidos de humedad y de aceite (Moreira et al., 1999; Dana y Saguy, 2006; Garayo y Moreira, 2002).

Se han utilizado diversos tratamientos para obtener un producto frito de alta calidad, (deshidratación osmótica, congelación, glaseado de productos, extrusión, impregnación al vacío y horneado), desafortunadamente, ninguno de ellos reúne las características esenciales de un producto frito: flavor, textura, apariencia y sensación bucal (Dueik et al., 2010).

El proceso de fritura al vacío es similar al de la fritura convencional, sin embargo éste se efectúa en un sistema cerrado, lo que permite reducir la presión hasta niveles considerablemente inferiores a la presión atmosférica dentro de la freidora, haciendo que el punto de ebullición del agua del alimento sea menor. La exposición del aceite a baja temperatura y a un ambiente con poca cantidad de oxígeno hace que el producto se conserve por más tiempo y se mejoren aspectos de calidad como el color y el sabor y se reduzca la cantidad de acrilamidas (Garayo y Moreira, 2002; Mariscal y Bouchon, 2008).

Algunos de los resultados encontrados en experimentos de fritura por inmersión usando presiones de vacío concluyen que los snacks de papa absorben menos aceite que al usar presión atmosférica (Da Silva y Moreira, 2008). Muchas de las investigaciones en este campo se dirigen hacia fritura por inmersión usando presión atmosférica y sólo unas cuantas usan presiones de vacío.

El cultivo de plátano en Colombia se ha constituido en un renglón de importancia socioeconómica, desde el punto de vista de seguridad alimentaria y generación de empleo. Dentro del sector agropecuario, ocupa el tercer lugar después de la caña de azúcar y la leche entera fresca, con 2.815.050 toneladas (FAOSTAT, 2012).

La actividad agroindustrial del plátano ha registrado un crecimiento durante la última década, aunque con una incidencia muy pequeña como consumidora de materia prima. Se estima que el mercado industrial absorbe alrededor de 12 mil toneladas, que se destinan principalmente a la preparación de comestibles (snacks), harinas, productos procesados para consumo humano y alimentos concentrados para consumo animal (AGRONET, 2010).

OBJETIVOS

General

Evaluar la influencia de las condiciones del proceso de fritura por inmersión de rodajas de plátano variedad Dominico Hartón (Musa AAB) sobre los coeficientes de transferencia de calor y masa, y la calidad fisicoquímica del producto.

Específicos

- ❖ Caracterizar física y químicamente cuatro variedades de plátano en estado de madurez verde.
- ❖ Determinar el efecto que tienen las condiciones de proceso (temperatura, tiempo y presión) sobre los coeficientes convectivos de calor y masa y el coeficiente de difusión efectivo de humedad a través de soluciones analíticas.
- ❖ Evaluar el efecto de las condiciones de proceso (temperatura, tiempo y presión) sobre los parámetros de calidad: contenido de humedad, contenido de aceite, textura y color.

1. REVISION BIBLIOGRAFICA

1.1. MATERIA PRIMA Y BIODIVERSIDAD

La especie *Musa paradisíaca*, conocida comúnmente como plátano, es una planta herbácea monocotiledónea que pertenece a la familia Musáceae, a ella corresponden todos los frutos que deben cocinarse para su consumo (SIPSA, 2007). La producción anual a nivel mundial de esta planta, así como los principales países productores de la misma se presentan en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1. Producción anual de plátano en los primeros 20 países a nivel mundial

Año	2006	2007	2008	2009	2010
Producción (Toneladas) en miles	32063	33216	33392	34424	34910

Fuente: FAOSTAT, 2012.

Tabla 2. Principales países productores de plátano a nivel mundial en el año 2010

País	Uganda	Ghana	Colombia	Rwanda	Nigeria	Camerún
Producción (Toneladas) en miles	9550	3537.7	2815.9	2749.2	2733.3	2604.1

Fuente: FAOSTAT, 2012.

La biodiversidad del cultivo del plátano en Colombia está presente en todo el territorio nacional, desde el nivel del mar hasta los 2200 msnm; se conocen aproximadamente 30 variedades las cuales poseen diversos usos de acuerdo con sus características físicas, químicas o reológicas (Dufour *et al.*, 2007), por tal

razón se considera de gran importancia para el desarrollo socioeconómico del país, ya que además de ser provisión alimentaria también genera empleo. Sin embargo, se ha encontrado que sólo 13 % de la producción de plátano está como monocultivo tecnificado y el 87% restante se cultiva asociado a otros cultivos, especialmente el café (SIPSA, 2007). Los principales centros productivos de plátano se encuentran concentrados en la zona cafetera de la región andina (Tabla 3), los cuales abarcan 59% de la producción nacional; seguida en menor cuantía por la región Caribe, Pacífica y la Orinoquía. Entre las variedades más representativas en el país se encuentran la variedad Hartón, Dominico Hartón, Dominico, Guayabo/Comino/Pompo y Guineo.

Tabla 3. Principales departamentos productores de plátano a nivel nacional, 2009

País	Eje cafetero*	Antioquia	Córdoba	Meta	Valle del Cauca
Producción (Toneladas) en miles	679.8	447.5	148.4	215.1	163.2

*Eje cafetero: Caldas, Quindío, Risaralda

Fuente: ENA, 2009.

La biodiversidad del plátano colombiano se estableció básicamente a partir de dos parámetros, la caracterización física y el porcentaje de materia seca. Cayón *et al.* (2000) analizaron las variedades Dominico Hartón y Cachaco y reportaron los siguientes porcentajes, pulpa 61.4 y 58.3; cáscara 38.6 y 41.68 y materia seca 42.1 y 31.6, respectivamente.

El tamaño, calidad y presentación de los plátanos producidos en la región cafetera central de Colombia, están influenciados por la variación de las condiciones ambientales en las zonas de producción, principalmente por el estrés hídrico durante el período de desarrollo del racimo. No obstante, el plátano presenta gran

adaptabilidad a un amplio rango de condiciones ambientales y su desempeño productivo está condicionado a la adaptación de su fisiología a diversos ambientes (Cayón *et al.*, 2000). Así, las musáceas responden de manera diferente al déficit de agua, observándose que los clones con genoma balbisiana (ABB, grupo Bluggoe) son resistentes a la sequía, mientras que los plátanos (Musa AAB, grupo Plantain) son muy susceptibles a ella, lo que genera una disminución en el peso final del racimo (Cayón *et al.*, 2000). La producción de un clon de plátano en una localidad depende de su genotipo y del ambiente, pudiendo variar en diferentes condiciones agroclimáticas.

En América Latina y en el Caribe las variedades de plátano tipo “Plantain” más cultivadas obedecen a los tipos French (Dominico), False Horn (Dominico Hartón) y Horn (Hartón), siendo éstos los más comerciales; sin embargo, son muy susceptibles a enfermedades como la Sigatoca negra y amarilla, que causan drásticas reducciones en la producción, altos costos de manejo al productor y de adquisición al consumidor. La Fundación Hondureña de Investigación Agrícola, FHIA, a través del mejoramiento genético de las plantas de plátano ha producido algunos híbridos de variedades conocidas (AAAB), resistentes a las sigatocas mencionadas, como el FHIA 20 y FHIA 21; estos frutos poseen grandes atributos sensoriales cuando se les prepara fritos en tajadas y patacones (Arcila, 2002).

Los racimos de Dominico Hartón provenientes del municipio de Palestina (Caldas, Colombia), región que se encuentra a 1000 metros sobre el nivel del mar, presentan altos valores en el peso del racimo, longitud y cantidad de pulpa en los frutos, comparados con los producidos en otras regiones geográficas del país; presentan además menor número de dedos, de siete a ocho manos y de 45 a 50 frutos, destacándose también por un mayor peso individual (Cayón *et al.*, 2000).

Por otra parte, el contenido de almidón en la variedad Dominico Hartón, no dependen de la altura del nivel del mar donde se cultive, ya que sus valores entre 74 y 77%, para época lluviosa y seca, respectivamente, De forma similar el

contenido de azúcares totales está entre 5 y 2% y el contenido de azúcares reductores está entre 4 y 3% de acuerdo a la época (Cayón *et al.*, 2000).

La variedad de plátano África es un clon triploide AAB, originario de África y adaptado a las condiciones de Colombia. Este clon se ha evaluado en la zona cafetera colombiana, encontrando una buena adaptabilidad a diferentes altitudes y se ha señalado como una de las variedades más promisorias de la región cafetera, aunque el peso del racimo, el número de manos y el número de dedos sea inferior a otras variedades. Sus racimos pesan entre 10.2 y 49.2 kg, con 7 a 8 manos sin prácticas culturales; su pulpa es de consistencia suave y su contenido de almidón es superior al de la variedad Dominico Hartón tanto en estado verde como maduro. A este híbrido se le deben realizar prácticas culturales como el desbelloteo para que sus dedos puedan alcanzar mayores pesos, aunque el número de manos sea de 4 a 5 (Arcila *et al.*, 2002).

En Colombia el plátano se consume en distintas formas, en función de la variedad. Por ejemplo, para la cocción en agua, sancochos o coladas, se utilizan variedades Guineo y Rollizo; para cocción en aceite, el Dominico Hartón o el Hartón, para productos preformados o masas, el Cubano Blanco y el Guayabo (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2005).

La Tabla 4 presenta la composición bromatológica de algunas variedades de plátano, donde se destaca el bajo contenido de humedad, menor a 60%, en las variedades que pertenecen al grupo Plantain (AAB) (Hartón, Dominico Hartón, Dominico y África).

Tabla 4. Composición bromatológica de algunas variedades de plátano en estado verde

	Guineo AAA ^a	Popocho ABB ^a	Dominico AAB ^a	Hartón AAB ^c	Dominico Hartón AAB ^b
Pulpa (%)	60	60	60	65	77
Humedad (%)	75.2	68.9	59.7	59.4	57.9
Proteínas (%)	1.21	1.0	1.2	1.2	1.3
Grasa (%)	0.1	0.2	0.1	0.2	
Carbohidratos (%)	21.5	27.9	37.4	37.8	37.64
Fibra (%)	0.58	1.1	0.7	0.5	0.11
Cenizas (%)	1.12	0.9	0.9	0.9	0.9
Ca (mg)	3.5	6	5	4	7
P (mg)	82.8	40	31	39	75
Fe (mg)	1.1	0.4	0.5	0.5	1.3
Vitamina A (U.I.)	160	140	1000	1060	
Tiamina B1 (mg)	0.04	0.03	0.07	0.06	0.06
Ácido ascórbico, C (mg)	15	20	20	20	20

Fuentes: ^a Instituto Nacional de Nutrición, 2005.

^b Cayón *et al.*, 2000, ^c Morales, 1994.

1.2. FRITURA POR INMERSIÓN

La fritura por inmersión es un proceso de cocción mediante el cual un producto alimenticio se sumerge en aceite caliente a temperaturas por encima del punto de ebullición del agua) y a diferentes presiones de operación (vacío, atmosférica y sobreatmosférica) por un tiempo determinado. Es una operación de deshidratación en la cual interaccionan los fenómenos de transferencia de calor y masa (Ngadi *et al.*, 2009).

La fritura por inmersión se usa ampliamente en la industria de alimentos, debido a que mejora la palatabilidad de los productos fritos, suministrándoles características organolépticas deseables con relación al sabor y aroma (flavor), textura (crujencia) y apariencia (color, forma y brillo); además de lo anterior, los consumidores exigen productos fritos que presenten aspectos de nutrición y salud, ya que el consumo de grasas saturadas es un factor de incremento de enfermedades coronarias. (Moreira *et al.*, 1999; Dana y Saguy, 2006).

La fritura por inmersión se puede realizar en lotes y en continuo. Los procesos por lotes (discontinuos) son de fácil manejo, pero reservados a la producción de bajo volumen. El calentamiento es directo, la regulación manual compensa en parte la disminución de la temperatura por algunos segundos cuando se introduce el producto. Utiliza un alto volumen de aceite (relaciones bajas de masa del producto/masa de aceite 1/10) para una buena inercia térmica, pero esto produce alta heterogeneidad de temperatura dentro del baño. El mejor resultado se obtiene al utilizar freidoras de amplia superficie y baja profundidad, para favorecer la convección natural responsable de la homogenización espacial de la temperatura del baño (Totte *et al.*, 1996).

La operación en continuo se realiza en una cinta transportadora de acero inoxidable que se sumerge en un tanque con aceite termostáticamente controlado; el alimento se mueve en el aceite por paletas de movimiento lento y, ambos se sumergen en un colector, si el alimento flota, se retiene bajo la superficie por un segundo colector. Estos procesos generan diferencias de temperatura del aceite en el baño debido a que la banda transportadora hace pasar el producto de una zona caliente a una zona fría (Rodríguez, 1998).

1.2.1 FRITURA POR INMERSION A PRESION ATMOSFERICA

El proceso de fritura por inmersión a presión atmosférica es el más utilizado tanto a nivel industrial como casero; usa aceite caliente desde 140°C hasta 190°C. Las altas temperaturas ocasionan el aumento en la velocidad de salida de agua, lo que a su vez hace que se forme en la superficie del alimento una costra difícil de romper. Durante la fritura salen otros compuestos del alimento, además, de vapor de agua, que combinados con exposiciones a altas temperaturas del aceite por largos tiempos, originan compuestos tales como la acroleína o la acrilamida, que dan como resultado degradación del aceite (Gamble *et al.*, 1987, Saguy y Phintus, 1995).

En la operación de fritura por inmersión atmosférica Farkas *et al.*, (1996a) identificaron cuatro etapas:

- ❖ CALENTAMIENTO INICIAL: El alimento se introduce en el baño de aceite caliente, el cual debe estar por encima del punto de ebullición del agua, la energía se recibe por convección natural hasta la superficie del alimento y luego pasa por conducción hasta el centro. Esta etapa se distingue por el aumento de la temperatura hasta la ebullición del agua a la presión respectiva (calor sensible).
- ❖ EBULLICIÓN SUPERFICIAL: Se caracteriza por la pérdida de humedad de la superficie, el aumento del coeficiente de transferencia de calor y el inicio de la formación de la costra. La evaporación del agua también genera otros fenómenos importantes como la disminución en el volumen del alimento y el aumento de la porosidad y la rugosidad de la superficie. La convección natural cambia a ebullición, lo que ocasiona aumento en el coeficiente de transferencia de calor, lo que a su vez aumenta la turbulencia en la superficie. La evaporación explosiva puede dar lugar a la formación de poros de gran tamaño en la superficie, y capilaridad dentro del alimento (Mellema, 2003).
- ❖ FORMACIÓN DE LA COSTRA: Es el período más largo de la fritura, durante el cual se transfiere la mayoría de humedad. La temperatura de la región central

se aproxima a la del punto de ebullición del agua. Ocurre también disminución de la transferencia de calor, debido a la baja conductividad de la costra y disminución constante de la tasa de transferencia de vapor desde la muestra. El contenido de humedad en la costra disminuye rápidamente, lo cual reduce la cantidad de burbujas de vapor que dejan la superficie, por lo tanto la costra se convierte en una barrera para la salida de la humedad. La temperatura de la superficie puede aumentar por encima de la temperatura de ebullición del agua. En esta etapa ocurren algunos cambios fisicoquímicos tales como retrogradación del almidón, reacciones de Maillard, transiciones vítreas y desnaturalización de proteínas (Saguy *et al.*, 1995. y Wang, 2005). Estos cambios benefician las propiedades organolépticas y el color de la costra.

- ❖ PUNTO FINAL: Existe un cese aparente de la pérdida de humedad del alimento durante la fritura, esta etapa se hace visible por la desaparición del burbujeo.

La primera y la cuarta etapa, presentan básicamente fenómenos de transferencia de calor, mientras que la segunda y la tercera etapa presentan en forma simultánea transferencia de calor y de masa.

Por su parte, Moreira *et al.* (1999) menciona tres etapas:

- ❖ *PREFRITURA*: Se caracteriza por las condiciones del material fresco (humedad, porosidad y densidad) antes de la fritura. En esta etapa no hay ganancia de aceite.
- ❖ *FRITURA*: Las propiedades del producto cambian. El contenido de humedad disminuye, la porosidad aumenta como resultado de la evaporación del agua y las propiedades físicas como la conductividad térmica, el calor específico y la densidad aparente disminuyen. Se estima que el 20 % del total de aceite se absorbe en esta etapa.
- ❖ *POSTFRITURA (ENFRIAMIENTO)*: Este período comienza inmediatamente después de retirar el producto frito del baño de aceite. La temperatura al interior de la muestra disminuye hasta alcanzar la temperatura ambiente. El

contenido de agua es constante y las propiedades físicas, a excepción de la densidad aparente, permanecen constantes. Se estima que el 80 % del total del aceite se absorbe durante este periodo.

Algunos valores del contenido de aceite en productos fritos a presión atmosférica se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Contenidos de aceite en alimentos fritos a presión atmosférica

Producto	Contenido de aceite (b.s.) (%)	Fuente	Producto	Contenido de aceite (b.s.) (%)	Fuente
Tajadas de papa	31.8	Saguy <i>et al.</i> , 2003	Pollo apanado	18.1	Wang <i>et al.</i> , 2005
Chips de plátano	28	Díaz <i>et al.</i> , 1996	Papas fritas	17.1	Wang <i>et al.</i> , 1992
Chips de maíz	23.4	Moreira <i>et al.</i> , 1999	Papas a la francesa (costra)	9.7	Bouchon <i>et al.</i> , 2000
Donas	22.9	Velez <i>et al.</i> , 2003	Papas a la francesa (centro)	0.25	Bouchon <i>et al.</i> , 2000
Tofú frito	20.2	Baik <i>et al.</i> , 2005	Papas a la francesa escaldada	4.08	Pedreschi y Moyano, 2005

1.2.2. FRITURA POR INMERSIÓN A PRESIÓN DE VACÍO

A diferencia de la fritura convencional, la fritura al vacío se efectúa en un sistema cerrado, lo que permite reducir la presión hasta niveles considerablemente inferiores a la presión atmosférica dentro de la freidora, haciendo que el punto de

ebullición del agua del alimento sea menor. La exposición del aceite a baja temperatura y a un ambiente con poca cantidad de oxígeno hace que el producto se conserve por más tiempo y se mejoren aspectos de calidad como el color y el sabor. Garayo y Moreira (2002) y Mariscal y Bouchon (2008) reportan valores de temperatura del aceite y presión de trabajo de 100°C y 3.11 kPa, respectivamente.

La fritura por inmersión utilizando presiones de vacío se considera una de las operaciones unitarias más promisorias a nivel mundial; esta tecnología se estudia y se utiliza principalmente en el continente asiático, en productos pesqueros, destacando a Indonesia, China y Tailandia (Fan *et al.*, 2005, Shyu y Hwang, 2001); en América se han realizado investigaciones en Estados Unidos (Garayo y Moreira, 2002, Ngadi *et al.*, 2009), Chile (Mariscal y Bouchon 2008) y Ecuador (Bravo *et al.*, 2006). En Colombia, la investigación apenas inicia, con productos autóctonos.

El mecanismo de fritura por inmersión al vacío es descrito por Garayo y Moreira (2002) en tres etapas:

- ❖ FRITURA: La temperatura de ebullición del agua dentro del alimento se reduce debido a la baja presión de vacío utilizada, lo que origina que la evaporación se presente en menor tiempo que en la fritura a presión atmosférica, ocasionando una ebullición menos vigorosa; el vapor generado actúa como una barrera a la penetración del aceite y la costra se forma en menor tiempo que en la fritura atmosférica.
- ❖ PRESURIZACIÓN: Se inicia cuando se recupera lentamente la presión atmosférica en el interior del equipo; la presión en los poros se incrementa rápidamente hasta alcanzar la presión atmosférica a medida que el aire y el aceite que permanecen en la superficie del alimento ingresan a los espacios vacíos dejados por el agua evaporada, sin embargo a baja presión el aire se introduce más rápido que el aceite dentro del espacio del poro, obstruyendo el paso del aceite hacia el interior del producto.

❖ ENFRIAMIENTO: Al retirar el producto del baño de aceite, el vapor de agua se condensa en el interior del alimento ocasionando a su vez una disminución en la presión interna, el aceite adherido a la superficie del alimento penetra dentro del alimento debido al efecto de vacío, al igual que en la fritura convencional, con la diferencia de que en la fritura al vacío podría existir menos aceite adherido a la superficie del producto, ya que la baja presión hace que parte de éste no se mantenga sobre la superficie sino que cae al baño de aceite, lo que resulta en un contenido menor de aceite del producto frito (Dana y Saguy, 2006; Gamble *et al.*, 1987).

En los estudios efectuados sobre fritura a presión de vacío, se evalúa principalmente el efecto de la temperatura de fritura, la presión absoluta de vacío y el tiempo de fritura, sobre las propiedades de calidad de los productos fritos, como contenido de humedad, contenido de aceite, textura y color, no todos los productos sometidos a fritura a presión de vacío presentan igual tendencia en las variables de calidad, debido a la diferencia en su composición; por ejemplo en el procesamiento de papa se encontró que al aumentar la presión de vacío, la velocidad de pérdida de humedad y la ganancia de aceite también aumentaron (Garayo y Moreira, 2002). Comportamiento semejante encontraron Fan *et al.* (2005) y Da Silva y Moreira (2008) en el procesamiento de zanahoria y en la fritura de papa azul y mango respectivamente. El caso contrario se presentó papa dulce y habichuelas (Da Silva y Moreira, 2008). Algunas condiciones de proceso en fritura por inmersión al vacío se ilustran en la Tabla 6.

En los procesos de fritura, tanto a presión de vacío como atmosférica, se pueden realizar pre tratamientos a la materia prima, tales como escaldado, inmersión en soluciones azucaradas (fructosa, sacarosa y glucosa) y congelación, con el fin de mejorar la textura del alimento, y disminuir la absorción de aceite en el producto.

Tabla 6. Condiciones de operación y variables respuesta para la fritura por inmersión a presión de vacío

Producto	Temperatura del aceite (°C)	Presión de vacío (kPa)	Tiempo (min)	Contenido de agua (%)	Contenido de aceite (%)	Fuente
Trozos de manzana	90, 100, 110	3.115	20-25	2-3	26-29	Shyu y Hwang, 2001
Rodajas de papa	118 132 144	16.661 9.888 3.115	10 6 3.3	1.84±0.19 1.89±0.19 1.9±0.06	35.54 36.09 36.67	Garayo y Moreira, 2002
Piezas de papa	118, 125, 140	1.5	10	1.5	9.4	Granda <i>et al.</i> , 2004
Trozos de zanahoria	80, 100, 120	10 20	15	3	35	Fan <i>et al.</i> , 2006
Trozos de zanahoria	60 80 100	60 80 95	15	0.1	30	Fan <i>et al.</i> , 2005
Donas	180	3.00	3-5	23-30	15-20	Tan y Mittal, 2006
Piezas de papa	120	5.4		1.8		Troncoso <i>et al.</i> , 2007
Piezas de manzana	95,105, 115	16	15	Pérdida de agua 2.0-2.5 (g/g bs)	$\Delta T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, se absorbe entre 47 % y 55%	Mariscal y Bouchon, 2008
Tajadas de mango	121	< 1.33	3	1.48 ± 0.08	33 g/100g	Da Silva y Moreira, 2008

La fritura de muestras de manzana utilizando presión atmosférica y de vacío, con pre tratamientos, mostró menor pérdida de humedad y menor contenido final de aceite (Mariscal y Bouchon, 2008 y Shyu y Hwang, 2001). Otras investigaciones (Gamble *et al.*, 1987 y Pedreschi y Moyano, 2005) mostraron que al utilizar pretratamientos en la fritura de láminas delgadas de papa el contenido final de aceite se reduce. Duran *et al.* (2007) mostraron que las tajadas de papa impregnadas con NaCl, absorbieron menos aceite que las tajadas que se cubrieron con películas comestibles. Los aditivos y las películas como el NaCl o las harinas de trigo y de maíz disminuyen el contenido de aceite en el producto final; además le dan al producto un valor agregado reflejándose en una mejor crujencia. Capas de metil-celulosa redujeron la absorción de aceite de masas de papa en valores cercanos al 40%, sin modificar el contenido de agua de las muestras y tampoco afectaron los atributos de calidad (color y textura) (Dana y Saguy, 2006 y Bertolini *et al.*, 2007).

La absorción de aceite para un mismo nivel de deshidratación usualmente se reduce al aumentar la temperatura de fritura a un tiempo constante. Por ejemplo, láminas delgadas de papa, freídas a 120 °C tienen mayor contenido de aceite que las freídas a 180 °C (Pedreschi y Moyano, 2005). Tanto la temperatura como el espesor de muestras de papa presentan un efecto significativo en la ganancia de aceite y en la pérdida de humedad de los productos fritos según Wang (2005).

Los fenómenos de transferencia de calor y masa están influenciados por el desarrollo de la costra en la superficie del alimento. La ganancia y distribución de aceite en productos fritos ocurre principalmente cerca de la superficie, más exactamente en la costra. La formación de costra está estrechamente ligada a la distribución de grasa en el interior del producto frito. Los polímeros presentes en el aceite de fritura se absorben preferiblemente en la superficie de la costra o en las capas más externas. Estas capas contienen muchas más fracciones de aceite oxidado, polimerizado y carbonizado que las capas medias (Saguy y Pinthus, 1995). La penetración de aceite únicamente ocurre donde la temperatura ha sido

suficientemente alta para evaporar el agua, por ejemplo en la costra. La microestructura de la costra es un factor determinante de la ganancia de aceite (Phintus *et al.*, 1995). De acuerdo a un estudio realizado sobre papa por Aguilera y Hurtado (1997) la costra contiene alrededor de 6 veces más aceite que el interior del producto.

La porosidad inicial del producto se relaciona lineal y directamente con la ganancia de aceite durante el proceso de fritura hasta que la costra actúa como barrera para el ingreso de aceite al interior del alimento (Saguy y Pinthus, 1995).

De otro lado, la ganancia de aceite está relacionada con el tamaño del poro (radio y profundidad). Los poros de aproximadamente 1 μm de radio dan presiones de capilaridad comparables a la presión atmosférica, no obstante, para radios más pequeños la presión de capilaridad aumenta la ganancia de grasa si el poro está lleno de vapor. Otros factores determinantes son la profundidad del poro y la rugosidad de la superficie (Mellema, 2003; Pinthus y Saguy, 1993).

Existen otros factores importantes a tener en cuenta en la ganancia de aceite, por ejemplo el aumento de la gravedad específica y la disminución del espesor (Moreira *et al.*, 1997).

1.2.3. FENÓMENOS DE TRANSPORTE EN LA FRITURA POR INMERSIÓN

La fritura por inmersión involucra fenómenos de transferencia de calor (conducción y convección) y de masa (flujo de agua y flujo de aceite) (Wang, 2005); por lo tanto, la determinación de los fenómenos de transporte alrededor del alimento requieren establecer condiciones de frontera para las ecuaciones de transporte térmico y másico; al utilizar coeficientes de transferencia de calor por convección y de difusión para la transferencia de masa se logran caracterizar los flujos de calor y de masa a través de la interfase líquido/sólido. Así, la cuantificación de estos

coeficientes desempeña un papel importante en la fritura por inmersión (Singh, 1995; Hubbard y Farkas, 2000).

La fritura por inmersión es un proceso en estado transitorio complejo, debido a que la temperatura y la humedad dependen tanto del tiempo como de la posición. Al realizar un balance de energía y de masa sobre el objeto a analizar, se obtienen las ecuaciones diferenciales de segundo orden (1) y (2):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq L \text{ para } t > 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{1}{D_{AB}} \frac{\partial C}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq L \text{ para } t > 0 \quad (2)$$

La solución de las Ecuaciones (1) y (2) puede ser numérica o analítica; Crank (1975) presentó soluciones analíticas para diferentes condiciones iniciales y de frontera para la transferencia de masa, que pueden aplicarse a la transferencia de calor.

El proceso de transferencia de masa en la fritura por inmersión se presenta en dos direcciones, la primera corresponde a la transferencia de agua desde el centro del alimento y la segunda a la transferencia de aceite hacia el interior del alimento. El mecanismo de transferencia de masa es complementario al de transferencia de calor; la pérdida de humedad se debe al gradiente de concentración entre la superficie seca y el centro húmedo, y a la diferencia de presión que se presenta en el interior del alimento (Wang, 2005).

La remoción parcial o completa de agua es el principal objetivo de la fritura por inmersión, por esta razón, la predicción de la pérdida de humedad es uno de los

aspectos más importantes para modelar matemáticamente y controlar en el proceso (Costa *et al.*, 1999).

1.2.3.1. Soluciones numéricas, analíticas y empíricas

La difusión en sólidos es compleja debido a la fuerte influencia de los campos de fuerza en el proceso. En estos sistemas la segunda ley de Fick se utiliza a menudo unida a un coeficiente de difusión determinado experimental o matemáticamente. El valor numérico de los coeficientes de difusión en sólidos es pequeño a causa de los campos de fuerzas moleculares mayores, al creciente número de colisiones y a la consiguiente reducción de la libertad de movimientos de las moléculas (Hollman, 2002).

La relación entre la difusividad másica efectiva (D_0) y la temperatura del sistema se obtiene aplicando la ecuación de Arrhenius (Ecuación 3) (Saravacos y Maroulis, 2001). A partir de esta ecuación se puede calcular la energía de activación.

$$D_0 = D_{AB} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

La fuerza motriz de la transferencia de masa es el diferencial de presión causado por el cambio de fase del agua, de líquido a vapor, esta fuerza obliga a salir el agua hacia la superficie. La resistencia a la transferencia de masa se causa por la resistencia interna a la difusión másica y por una resistencia superficial. La resistencia superficial se debe normalmente al límite de la velocidad de convección y algunos autores la consideran despreciable, ya que el vapor de agua abandona rápidamente la superficie del objeto (Math *et al.*, 2004).

A diferencia de la transferencia de humedad, el transporte de aceite no está representado como un mecanismo de difusión. El modelo de las cinéticas de absorción de aceite se realiza generalmente con métodos empíricos, por la falta de un amplio conocimiento del mecanismo de transferencia que ocurre

principalmente en la etapa de enfriamiento. Los modelos empíricos que describen cinéticas de absorción tienen por lo general dos parámetros ajustables (Nielsen, 2006). Gamble *et al.* (1987) relacionaron la absorción de aceite en función de la raíz cuadrada del tiempo de fritura. Moreira *et al.* (1995b), Krokida *et al.* (2000a), Budzaki y Seruga (2005), y Moyano y Pedreschi (2006), consideraron la absorción de aceite en función del tiempo de fritura y emplearon la Ecuación 4 que es una ecuación cinética de primer orden para modelar este proceso. La representación gráfica de esta ecuación es similar a la forma que presentan los datos experimentales de absorción de aceite y se conoce como la hipérbola rectangular.

$$M_f(t) = \beta_0 + \frac{\beta_1 t}{\beta_2 + t} \quad (4)$$

Otros modelos que se han usado para la penetración del aceite son el modelo difusivo (Chen y Moreira, 1997) y un modelo basado en las fuerzas capilares y las diferencias de presión que describe la absorción de aceite durante el enfriamiento (Bouchon y Pyle, 2005).

Varios autores han solucionado las Ecuaciones (1) y (2) aplicadas a la transferencia de calor y de masa (agua) en la fritura por inmersión, de acuerdo a distintas condiciones, como la geometría del producto (placa, cilindro o esfera), el uso de frontera móvil, el número de dimensiones, la no existencia de transferencia de aceite en el período de inmersión y la porosidad.

Farkas *et al.*, (1996a) modelaron la operación de fritura por inmersión de geometrías infinitas. Los autores dividieron el trozo infinito en dos regiones (corteza y centro) y utilizaron los equilibrios macroscópicos para plantear las ecuaciones diferenciales parciales aplicadas a las transferencias del calor y de masa en cada región. A partir de estas ecuaciones propusieron soluciones para los parámetros de transferencia de calor y de masa, los cuales se sintetizaron en cuatro ecuaciones diferenciales parciales no lineales, con las condiciones de

frontera y condiciones iniciales respectivas, haciendo referencia a las cuatro etapas identificadas por los autores. Los autores emplearon el método de Crank Nicholson (diferencias finitas) para convertir las ecuaciones diferenciales a ecuaciones algebraicas no lineales. Los valores de entrada del modelo fueron el contenido inicial de humedad, las propiedades termofísicas del alimento, el coeficiente de transferencia de calor y la temperatura del aceite. Los resultados indicaron que la temperatura de la región central no se incrementó por encima del punto de ebullición del agua y en la región de la costra la temperatura presentó un aumento notable a medida que disminuyó el contenido de agua. El modelo permitió establecer que la velocidad de la transferencia de calor en la región central está controlada por la conductividad térmica y el calor específico del material; en relación con la transferencia de masa, el contenido final de humedad del producto frito está altamente influenciado por la difusividad másica del material, y el espesor de la costra se afecta por la conductividad térmica de la costra, la temperatura del aceite, el contenido de humedad y la conductividad térmica del centro.

Para describir la transferencia de calor durante la fritura, Farid y Chen (1998) desarrollaron un modelo matemático a partir de la teoría de la solidificación y la fusión de materiales; los autores consideraron dos zonas en el producto, separadas por una interfase y resolvieron el modelo resultante por el método de diferencias finitas. De esta manera el tiempo de cálculo para encontrar las soluciones a las ecuaciones diferenciales parciales, fue menor que el requerido por el modelo de Farkas *et al.* (1996b).

El modelo difusional propuesto por Moreira *et al.* (1995a y 1995b) para una dimensión y con condiciones de frontera móvil para el cálculo de la transferencia de masa (humedad) y la transferencia de calor en tortillas delgadas de harina de maíz se puede explicar partiendo de la Ecuaciones (1) y (2). Los autores asumieron humedad y temperatura iniciales uniformes en todo el alimento; encogimiento despreciable; difusividades térmica y de humedad constantes y

penetración espontánea de aceite dentro del alimento durante el enfriamiento. Los autores resolvieron numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales parciales planteando el método de diferencias finitas explícitas. En un trabajo posterior, Moreira (2001) resolvió el modelo propuesto aplicando la técnica de diferencias finitas; al considerar que la difusión constante es el principal mecanismo de la transferencia de agua durante el proceso de fritura.

Otro modelo propuesto (Ni y Datta, 1999), se refiere a medios porosos; el modelo incluye la transferencia de aceite, de vapor y de agua en un medio poroso no higroscópico. Se derivaron cinco ecuaciones de conservación para vapor de agua, agua líquida, aire, aceite y energía en un medio poroso. El sistema de ecuaciones se solucionó con el método de diferencias finitas centrales, con condiciones de frontera e iniciales. Los autores asumieron la existencia de un equilibrio térmico entre las fases e ignoraron la contribución de la convección como transporte de energía. El modelo consideró el transporte de aceite, agua, vapor y aire separadamente sin tener en cuenta cambios en la porosidad y su efecto en el transporte de energía y masa.

Sahin et al. (1999b) solucionaron la ecuación diferencial de difusión en una dimensión (Ecuación 1) utilizando diferencias finitas para determinar el coeficiente de transferencia de calor durante la fritura por inmersión de paralelepípedos de papa.

Costa *et al.* (1999) investigaron el efecto de la velocidad de pérdida de agua en el coeficiente de transferencia de calor durante la fritura por inmersión de papas a la francesa a 140 °C y 180 °C, usando la metodología de la capacidad global, representada en la Ecuación (5).

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = e^{-bt} \quad (5)$$

De donde:

$$b = \frac{hA}{\rho V C_p} \quad (6)$$

El recíproco de b tiene unidad de tiempo (por lo común s) y se llama constante de tiempo. Se pueden hacer dos observaciones a partir de las Ecuaciones 5 y 6:

- ❖ La ecuación permite determinar la temperatura $T(t)$ de un cuerpo en el tiempo inicial, de igual manera, el tiempo t requerido para alcanzar el valor específico de temperatura $T(t)$.
- ❖ La temperatura de un cuerpo se aproxima a la del medio ambiente, T_∞ en forma exponencial. Al principio, la temperatura del cuerpo cambia con rapidez pero, posteriormente, lo hace lentamente. Un valor grande de b indica que el cuerpo tenderá a alcanzar la temperatura del medio ambiente en un tiempo corto. Entre mayor sea el valor de b , mayor será la velocidad de disminución de la temperatura. Nótese que b es proporcional al área superficial, pero inversamente proporcional a la masa, y al calor específico del cuerpo, esto se debe a que tarda más tiempo en calentarse o enfriarse una masa grande, en especial cuando tiene un calor específico grande.

El coeficiente convectivo de transferencia de calor, puede estimarse realizando un balance de energía entre la muestra y el aceite (Farinu y Baik, 2007). La transferencia de calor total por convección del aceite a la superficie de la muestra es igual a la suma de la energía necesaria para vaporizar el agua contenida al interior del alimento (calor latente) y a la energía para calentamiento de la muestra (calor sensible) como se presenta en la Ecuación (7).

$$hA(T_m - T_s) \Delta t = mC_p \frac{dT}{dt} + \lambda \frac{dW}{dt} \quad (7)$$

Dicho método se validó con papas de geometría plana, en un tiempo de fritura de 300 s, el cual se dividió en 6 períodos, calculando el coeficiente convectivo de transferencia de calor en cada período. El balance de energía (Ecuación 7), usado

por Hubbard y Farkas (1999) y Budzaki y Seruga (2005) únicamente consideró el calor latente y desestimó el calor sensible dando lugar a la Ecuación (8):

$$h = \frac{dm}{dt} \frac{\lambda}{A(T_{\infty} - T_s)} \quad (8)$$

El calor de vaporización y el área superficial de las muestras se asumen constantes durante el proceso de fritura, esto limita esta metodología a la fase de ebullición.

Yildis *et al.* (2006) utilizó la combinación de métodos analíticos y gráficos, para determinar los coeficientes de transferencia de calor en la fritura por inmersión de paralelepípedos de papa, partiendo del balance de energía representado por la Ecuación (1).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq L \quad \text{para } t > 0 \quad (1)$$

Las condiciones de frontera e inicial planteadas para la solución fueron:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = 0 \quad \left(-k \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=L} = h(T_{x=L} - T_{\infty}) \quad T_{t=0} = T_i = T_s$$

Un tipo de solución (Ecuación 9) de esta clase de sistema (lámina infinita y diámetro >>espesor) lo propuso Crank en (1975) para sólidos infinitos usando el método de separación de variables y partiendo de la premisa que tanto la resistencia interna como la externa son finitas.

$$\frac{T(x,t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \operatorname{sen} \beta_n}{\beta_n + \operatorname{sen} \beta_n \cos \beta_n} \cos\left(\beta_n \frac{x}{L}\right) \exp\left(-\beta_n^2 \frac{\alpha t}{L^2}\right) \quad (9)$$

Las raíces en la ecuación (9) se obtienen a partir de la Ecuación (10):

$$Bi = \beta_n \tan \beta_n = \frac{hL}{k} \quad (10)$$

La ecuación (9) es aplicable a coordenadas cartesianas con una o dos dimensiones características para placas infinitas; además, para números de Fourier mayores a 0.2 es posible truncarla en el primer término. Los autores obtuvieron el coeficiente convectivo de transferencia de calor al utilizar la regla de la superposición, tomando datos experimentales de temperatura y tiempo para una geometría de dos dimensiones.

La Tabla 7 muestra los coeficientes convectivos de transferencia de calor obtenidos para diferentes productos, los cuales varían entre 80 W/m²K y 1100 W/m² K. Esta variación se presenta porque en algunos casos se tuvo en cuenta la evaporación del agua del alimento y en otros casos no.

Tabla 7. Coeficientes de transferencia de calor en fritura por inmersión (h)

PRODUCTO	TEMPERATURA °C	h (W/m ² °C)	REFERENCIA
Paralelep. de papa	150 - 190	90 - 200	Sahin <i>et al.</i> , 1999a
Masas de papa con piezas de Al	150 - 190	80 - 180	Sahin <i>et al.</i> , 1999b
Cilindros de papa	120 – 150 - 180	600 – 645 -895	Hubbard y Farkas, 1996
Papas a la francesa	140 - 180	443 - 650	Costa <i>et al.</i> , 1999
Chips de yuca	95	260-400	Vitrac <i>et al.</i> , 2002
	180	200-500	
Tofú frito	147 – 160 - 172	722 – 743 - 826	Baik y Mittal 2005
Masas de papa	160 - 190	94 - 775	Budzaki y Seruga 2005
Masa de króstula	160 – 170	579 - 584	Seruga y Budzaki, 2005
	180 - 190	597 - 658	
Masa de papa con harina (de 10-50%)	160 – 170	94 - 775	Budzaki y Seruga, 2005
	180 - 190	287± 15.4	
Papa	150 – 170 - 190	227± 8.0	Yildis <i>et al.</i> ,2006
		181±6.5	
Papa dulce	150 – 160	710 - 722	Farinu y Baik., 2007
	170 180	760 - 837	

En cuanto a la transferencia de masa, Math *et al.* (2004) propusieron que la difusión del agua en papad a la francesa tiene una relación directamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de fritura. Así mismo, partiendo de la ley de Fick de difusión en una dimensión (Ecuación 2), calcularon el transporte de humedad desde el centro hacia la superficie del producto frito, suponiendo que la resistencia superficial a la transferencia de masa es despreciable.

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{1}{D_{AB}} \frac{\partial C}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq L \text{ para } t > 0 \quad (2)$$

Las condiciones de frontera e inicial planteadas para la solución fueron:

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=0} = 0 \quad C_{A|_{x=L}} = C_{AL} \quad C_{A|_{t=0}} = C_{A0}$$

La solución del sistema para una lámina infinita (diámetro >> espesor) propuesta por Crank (1975) es:

$$\frac{M_t - M_\infty}{M_i - M_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \pi^2 D_0 t}{4L^2}\right] \quad (11)$$

Truncando en el primer término la Ecuación (11), asumiendo $M_\infty = 0$ y reordenándola se obtienen las Ecuaciones 12 y 13.

$$\frac{M_t}{M_i} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 D_0 t}{4L^2}\right] \quad (12)$$

$$-\ln\left(\frac{\pi^2 M_t}{8M_i}\right) = \left(\frac{\pi^2 D_0}{4L^2}\right) t \quad (13)$$

Graficando la Ecuación (13), se puede visualizar un comportamiento lineal entre $-\ln\left(\frac{\pi^2 M_t}{8M_i}\right)$ y t , lo cual permite a obtener la difusividad D_0 para cada temperatura de trabajo. Para obtener la difusividad efectiva D_{AB} en todo el rango de temperatura de estudio, los autores utilizaron la ecuación de Arrhenius (Ecuación 3).

Para determinar los coeficientes de transferencia de masa, Yildis *et al.* (2006) emplearon una metodología similar a la utilizada para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor, partiendo de la Ecuación 2 en donde, a diferencia de Math *et al.* (2004), la difusión del componente A es igual a la convección de A en el medio.

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{1}{D_{AB}} \frac{\partial C}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq L \quad \text{para } t > 0 \quad (2)$$

Las condiciones de frontera e inicial fueron:

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=0} = 0 \quad \left(-D_0 \frac{\partial C}{\partial x}\right)_{x=L} = k_c ((C_A)_{x=L} - (C_A)_\infty) \quad C_{A=0} = C_{A0}$$

La solución para esta clase de sistema lo propuso Crank (1975) utilizando el método de separación de variables dando como resultado la Ecuación (14).

$$\frac{C_A(x,t) - C_{A\infty}}{C_i - C_{A\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \operatorname{sen} \beta_n}{\beta_n + \operatorname{sen} \beta_n \cos \beta_n} \cos\left(\beta_n \frac{x}{L}\right) \exp\left(-\beta_n^2 \frac{D_0 t}{L^2}\right) \quad (14)$$

Donde las raíces de la Ecuación (14) están definidas por la Ecuación (15):

$$Bi = \beta_n \tan \beta_n = \frac{k_c L}{D_0} \quad (15)$$

Debido a que no se posee una distribución de humedades en el sistema, los autores integraron a través de todo el volumen de las muestras sobre la dimensión característica, dando como resultado la Ecuación (16):

$$\psi = \frac{C_A(t) - C_{A\infty}}{C_{AS} - C_{A\infty}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sin^2\beta_n}{\beta_n(\beta_n + \sin\beta_n \cos\beta_n)} \exp(-\beta_n^2 \frac{D_{AB}}{L^2}) \quad (16)$$

Esta metodología, se utilizó en la fritura por inmersión de piezas de papa, para calcular los parámetros de transferencia de masa (coeficiente de transferencia y difusividad másica efectiva) empleando datos experimentales de contenido de humedad en el tiempo para una geometría de dos dimensiones. Mientras que el coeficiente de transferencia de masa se incrementó linealmente, la difusividad másica se incrementó exponencialmente con un aumento en la temperatura de fritura.

Los valores de difusividad másica efectiva para distintos alimentos y geometrías se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Difusividad másica en fritura por inmersión a presión atmosférica

PRODUCTO	TEMPERATURA °C	GEOMETRÍA	DIFUSIVIDAD	
			MÁSICA x 10 ⁹ (m ² /s)	REFERENCIA
Alfalfa	110	Placa	7.73	Fasina <i>et al.</i> , 1996
Salchichas	180	Cilindro infinito	131	Dincer y Yildis, 1996
Donas	180-190-200	Cilindro hueco	736-788-617	Velez y Sosa, 2003
Papa	165-175-180-185	Placa. Resistencia externa infinita	2.83-3.65-3.87-5.03	Math <i>et al.</i> , 2004
Krostula	160-190	Placa	5.8-9.7	Budzaki y Seruga, 2005
Papa	150-170-190	Placa. Resistencia finita	9.2±1.1-11±1.0-18.2±0.7	Yildis <i>et al.</i> , 2006
Papa escaldada	120-140-160-180	Placa. Resistencia externa infinita	4.93-4.18-0.12-0.18	Pedreschi <i>et al.</i> , 2007
Manzana	140-150-180	Placa	10.8-12.7-15	Bravo <i>et al.</i> , 2008

1.3 CALIDAD DE LOS PRODUCTOS FRITOS

El procesamiento de frutas y vegetales causan cambios irreversibles a los tejidos y a la estructura de los mismos. La turgencia de los productos frescos depende de los constituyentes en la pared de la célula y en los espacios intracelulares. Esos constituyentes contienen celulosa, hemicelulosa y pectinas, generalmente referidas a polisacáridos diferentes del almidón y la lignina (Fennema, 1996). La estructura celular de los tejidos externos de frutas y vegetales se daña parcialmente durante los tratamientos térmicos, el contenido de pectinas se reduce, las proteínas se desnaturalizan, las enzimas se inactivan y los constituyentes químicos solubles en agua se expulsan parcialmente fuera del fruto (Grazyna y Grazyna, 2005).

En la fritura por inmersión de alimentos, la calidad está definida en términos de la calidad del aceite empleado y del tipo de producto a freír. Las características más significativas de calidad de los productos fritos son: apariencia (color, forma y disminución del volumen), flavor (sabor y olor), textura (dureza o fragilidad) y nutrición (conservación de vitaminas del producto frito y formación de acrilamida en el aceite) (Moreira *et al.*, 1999).

1.3.1. COLOR

El color es uno de los principales factores que influyen en la aceptación del producto frito por parte del consumidor; puede indicar la calidad del producto e igualmente influir en el reconocimiento del sabor. La evaluación sensorial y la comparación con estándares, son las técnicas más comunes para la determinación de las diferencias de color en productos fritos de la industria alimentaria (Moreira *et al.*, 1999).

El color es una característica de apariencia tridimensional. A través del tiempo se han inventado varias formas de medir el color; en 1976 la Organización Internacional de la Iluminación encargó a la Comisión Internacional de l'Eclairage

(CIE) para desarrollar métodos para calcular numéricamente el color, uno de estos desarrollos es un espacio de color con coordenadas L^* , a^* y b^* , denominado CIELAB, muy utilizado en la actualidad para medir colores de objetos en todos los campos. En este método, L^* es el campo de la luminosidad y va de -100 (negro) a 100 (blanco); a^* representa la variación entre rojos (valores positivos) y verdes (valores negativos) y b^* representa la variación entre amarillos (valores positivos) y azules (valores negativos) como se puede visualizar en la Figura 1. (Gilabert, 1998).

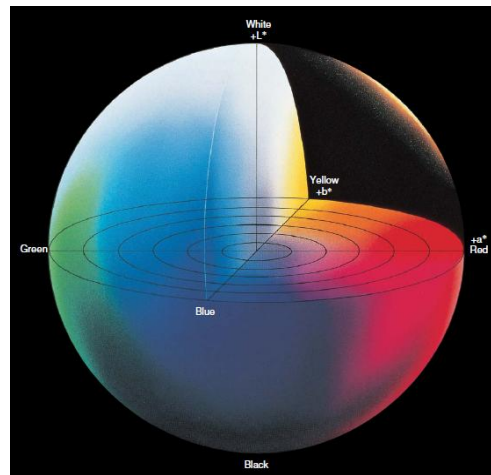


Figura 1. Representación espacial del parámetro color

El cambio en el color de muchos vegetales durante la fritura ocurre debido al pardeamiento no enzimático conocido como reacción de Maillard, la cual es el resultado de la reacción entre azúcares reductores y aminoácidos a temperaturas elevadas (Bravo *et al.*, 2006). El color se afecta por las condiciones del proceso, en especial por el tiempo, la temperatura y el tipo de aceite, así como por las características del producto, tamaño y variedad. Otra forma de conseguir una coordenada de color en la fritura por inmersión a presiones de vacío es estimar la diferencia de color total (ΔE) entre el promedio de los chips (j) y el alimento frito (i) a cada condición mediante la Ecuación 17.

$$\Delta E = \sqrt{(L_j^* - L_i^*)^2 + (a_j^* - a_i^*)^2 + (b_j^* - b_i^*)^2} \quad (17)$$

Garayo y Moreira (2002) y Granda *et al.* (2004) observaron valores de la coordenada L^* entre 58 y 52 y de la coordenada b^* entre 30 y 25 en tajadas de papa fritas a condiciones atmosféricas y de vacío, respectivamente, mostrando que el brillo disminuye y la intensidad del color amarillo es menor al aplicar vacío en la fritura.

En muestras de zanahoria freídas al vacío, Fan *et al.* (2005), observaron diferencias significativas en las coordenadas de color L^* y b^* , cuando la presión de operación cambió de la atmosférica (95 kPa) a presión de vacío (60 kPa).

En la fritura por inmersión de tajadas de manzana, Shyu y Hwang (2001), observaron que la coordenada L^* disminuyó de 50 a 40, con el aumento de la temperatura de 90 a 110 °C, con tiempos de fritura entre 5 y 30 min, además, el cambio en la diferencia de color total (ΔE) mostró un aumento de 5 a 18.

De otro lado, en la fritura de donas, Tan y Mittal (2006), concluyeron que el cambio del color total ΔE (14; 16 y 20), es independiente del grado de vacío utilizado (3; 6 y 9 kPa) y de la temperatura del aceite (150; 165 y 180°C).

En la fritura por inmersión a presión atmosférica y de vacío de tajadas de manzana, Mariscal y Bouchon (2008), encontraron que el cambio en el color más importante ocurrió en la coordenada L^* (60 y 80 respectivamente). En cuanto a ΔE , observaron que tuvo un valor mucho menor para las condiciones de fritura al vacío que para las condiciones atmosféricas (20 unidades menos). Cabe anotar que las condiciones de proceso establecidas en este estudio fueron especiales debido a que se compararon las coordenadas de color bajo la misma fuerza equivalente térmica (ΔT), la cual se define como la diferencia entre la temperatura del aceite y la temperatura de ebullición del agua a la presión de trabajo respectiva.

La fritura por inmersión con tajadas de plátano osmodeshidratadas, a presión atmosférica realizada por Ikoko y Kuri (2007), mostró un color amarillo oro (L^*

entre 45 y 65 y b^* entre 20 y 40) para las muestras pretratadas, el cual fue más aceptable que las muestras sin pretratamiento después de cinco minutos.

Los estudios anteriores concluyen que las coordenadas de color L^* y b^* y ΔE no tienen un comportamiento definido para todos los productos fritos, posiblemente debido a la diferencia entre las composiciones de las materias primas utilizadas.

1.3.2 TEXTURA

La textura de un producto alimenticio, es función de los elementos estructurales del alimento y de la forma en los perciben los órganos sensoriales. Bourne (2002) asegura que dar una definición precisa y exhaustiva de la textura es difícil, por lo cual la define mediante los siguientes puntos:

- ❖ Es un grupo de propiedades caracterizables por numerosos parámetros y no dependen de una sola propiedad.
- ❖ Las propiedades físicas relacionadas con la textura son las propiedades reológicas o mecánicas.
- ❖ La medida objetiva de las propiedades de textura se hace generalmente por medio de magnitudes básicas como masa, distancia y tiempo.

Esta propiedad es una característica de calidad muy importante para los productos fritos, los cuales cambian su estructura al retirar el agua, originando cambios texturales evidenciados en la formación de una costra que proporciona al alimento el atributo característico de crujiente; esta costra es consecuencia de la alta temperatura que se emplea en la fritura por inmersión (Bravo *et al.*, 2006; Moreira *et al.*, 1999). El contenido de humedad afecta la textura de los alimentos secos tipo snack o pasabocas, debido a la plastificación y ablandamiento de la matriz almidón/proteína, lo que altera la fuerza mecánica del producto (Moreira *et al.*, 1999).

Los métodos instrumentales para medir la textura en los alimentos pueden clasificarse como fundamentales, empíricos o imitativos. Las evaluaciones fundamentales miden parámetros físicos simples tales como corte, deformación, viscosidad y elasticidad. Las valoraciones empíricas se correlacionan bien con la calidad textural, y los métodos imitativos reproducen las condiciones a las cuales está sujeto el alimento en la práctica.

Los métodos fundamentales utilizan la determinación de la fuerza de ruptura (o punto de quiebre o dureza) como una medida de la crujencia del producto frito, en las investigaciones en muestras de papa dulce y de mango el punto de ruptura fue más alto en los productos tratados a presión de vacío que en los tratados a presión atmosférica, a diferencia a lo que ocurre en las muestras de papa azul y las habichuelas, en donde el punto de quiebre es menor cuando se fríe a presión de vacío (Da Silva y Moreira, 2008).

De acuerdo con Shyu *et al.* (2005) en trozos de manzana freídos al vacío a 110°C, en los primeros 5 minutos la fuerza de ruptura de las tajadas fue de 1000 gf; después de 25 minutos a 110 °C, el punto de quiebre de las tajadas disminuyó por debajo de 500 gf, valor que fue catalogado como una buena crujencia por el análisis sensorial. Esto permitió concluir que el tiempo de fritura a presión de vacío afecta la textura de los productos fritos.

En muestras de zanahoria, Fan *et al.* (2005), concluyeron que a menor presión de vacío menor dureza en las muestras y que la temperatura del aceite no tuvo efecto significativo sobre la dureza de las tajadas.

En la fritura por inmersión al vacío de tajadas de papa, Garayo y Moireira (2002) observaron un aumento significativo en la fuerza de ruptura al aumentar la temperatura del aceite a presión de vacío constante y además concluyeron que la fuerza de ruptura disminuyó cuando la presión bajó. Otros resultados obtuvieron Granda *et al.*, (2004) cuando fritaron muestras de papa a presión de vacío al no

hallar significancia estadística en los valores de dureza en función del tiempo y Segnini *et al.* (1999), determinaron que la variabilidad en la fuerza de quiebre de muestras de papa aumentó a presión atmosférica constante con un aumento de la temperatura del aceite.

En fritura de donas, Tan y Mittal (2006), observaron que la dureza disminuyó al aumentar la presión de operación a la misma temperatura, sin embargo la fuerza de ruptura aumentó al tener la presión constante con un aumento de la temperatura del aceite.

Pedreschi y Moyano (2005) evaluaron la evolución de la textura y la ganancia de aceite en piezas escaldadas de papa durante la fritura por inmersión atmosférica, concluyendo que tanto la temperatura del aceite como el pretratamiento tuvieron significancia estadística ($P < 0.05$) sobre la textura. El pretratamiento incrementó significativamente la crujencia disminuyendo la absorción de aceite.

En todos los estudios mostrados se puede observar diferencia del comportamiento de la fuerza de ruptura de los productos fritos, ante los cambios de la presión del sistema, el tiempo de freído y la temperatura del aceite. Se puede concluir que las distintas matrices vegetales generan comportamientos distintos debido a su composición, ver Tabla 9.

Tabla 9. Fuerza de quiebre en productos fritos al vacío

Producto	Temperatura del aceite(°C)	Tiempo (min)	Fuerza de quiebre (N)	Referencia
Manzana	90-100-110	5	9.8 ± 1.7	Shyu <i>et al.</i> , 2001
Manzana	110	25	4.9 ± 0.3	Shyu <i>et al.</i> , 2001
Zanahoria	100	15	3.9 ± 1.3	Fan <i>et al.</i> , 2005
Papa	118-140		2.48-3.47	Garayo y Moreira, 2002
Mango	121	3	70 ± 21	Da Silva y Moreira, 2008
Papa dulce	130	2	70 ± 5	Da Silva y Moreira, 2008
Papa azul	121	7	100 ± 12	Da Silva y Moreira, 2008

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIA PRIMA Y MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN

Se utilizaron plátanos de las variedades África (AAB) y Dominico Hartón (AAB) y los híbridos FHIA 20 (AAAB) y FHIA 21 (AAAB), cosechados entre febrero de 2007 y abril de 2008 provenientes de la granja Montelindo, propiedad de la Universidad de Caldas, ubicada en el municipio de Palestina, departamento de Caldas, Colombia, a una altitud de 1050 m.s.n.m., temperatura promedio de 22.5 °C, y humedad relativa de 76 %; la zona presenta una precipitación de 2100 mm por año y suelo de origen volcánico (González *et al.*, 2005). Ver información detallada en los anexos 1 y 2. El almacenamiento de los racimos, se hizo en una cámara ambiental a 14 ± 2 °C y 85% de humedad relativa. Para asegurar un estado de madurez verde en el fruto se estableció un valor límite máximo de 9°Brix en las muestras experimentales.

En las cuatro variedades de plátano se evaluaron las características físicas de los plátanos pelados y sin pelar (peso, longitud, diámetro central, densidad y porcentaje de cáscara), fisicoquímicas (materia seca), químicas (azúcares totales y reductores y contenido de almidón), y reológicas (temperatura de inicio de empastamiento o de gelatinización, viscosidad máxima, viscosidad de la pasta fría o mínima y facilidad de cocción). El protocolo para las pruebas propuestas se presenta en el anexo 3.

2.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Se desarrolló un protocolo de análisis para evaluar la diversidad de forma, y la variabilidad entre racimos, entre las manos de un racimo y entre los dedos (plátanos) de una mano. Los racimos se cosecharon conservando las condiciones agronómicas establecidas en el anexo 2 y se registraron los pesos de cada uno. A cada plátano se le hizo un análisis físico con cáscara y sin ella, además de las

mediciones de peso, longitud, perímetro central y densidad aparente. Después de pelado el plátano, se pesó la cáscara, la cual no debe contener partes de pulpa.

2.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MATERIA SECA

En el análisis químico realizado a muestras de harina de plátano; se determinaron azúcares totales y reductores (glucosa, fructosa y sacarosa) en un extracto etanólico acuoso, basado en la capacidad que posee el grupo carbonilo (radicales aldehídos o cetónicos) potencialmente libre de reducir iones metálicos, preferiblemente cobre y plata, en soluciones alcalinas. Adicionalmente se realizó la determinación enzimática del contenido de almidón, a partir de la dispersión del almidón en medio acuoso, seguida de una hidrólisis enzimática parcial obteniendo dextrinas con α -amilasa termoestable, completando la hidrólisis con amiloglucosidasa. La glucosa obtenida se cuantificó por colorimetría, el método completo de cuantificación se encuentra en el anexo 3. Además, se determinó la cantidad de humedad en las variedades e híbridos de plátano estudiados usando un horno de convección forzada a una temperatura de 105 °C hasta peso constante.

2.1.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Se utilizó el software SPSS para Windows v.15 para la obtención de la estadística descriptiva (el promedio o media usada fue la mediana), el test de normalidad (Shapiro-Wilk), la comparación de medias (t-Student, ANOVA), el análisis de componentes principales y la prueba de Ward que busca la mínima variabilidad dentro de los conglomerados (cluster). En el anexo 4 se explica el método para determinar el número de repeticiones.

2.2. FRITURA POR INMERSIÓN

2.2.1. MATERIALES Y EQUIPOS

Para la fritura se utilizó una freidora construída por Talsa. La freidora posee una resistencia eléctrica de 1800 Watt y un termopozo ubicados en el fondo del vaso freidor, además de una tapa provista de un pivote de sujeción con movimiento vertical, el cual tiene a su vez un termopozo y una canastilla donde se colocan las muestras.

La medición de la temperatura del aceite y del producto se realizó con dos termopozos con termopares tipo K. Estos termopares se conectan a un sistema de adquisición de datos (Marca IOtech, Personal Dat/50 series) que registra la temperatura. Este módulo se conecta a un computador el cual tiene un programa desarrollado en lenguaje Visual Basic en la Universidad del Valle, que permite el registro de temperaturas cada 1.27 segundos. Adicionalmente el sistema tiene una interfase de potencia (relay de estado sólido), que se utiliza para proveer la potencia necesaria para activar la resistencia de la freidora; dicha interfase de potencia ubicada entre el equipo de adquisición de datos y la freidora (Arboleda y Chavez, 2006) funciona con una pila de carbono de 9 V.

La bomba de vacío (Vac Torr 25 T.M. Presicion Scientific Company) funciona con una presión absoluta de succión de 13.4 kPa. Se trabajó a presión absoluta entre 17 kPa y 90 kPa, esta última corresponde a la presión absoluta de la ciudad de Santiago de Cali.

La oleína de palma fue comprada en el sector comercial de la ciudad de Cali, sus especificaciones fisicoquímicas se dan en la Tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones Fisicoquímicas de la oleína de palma.

Análisis Fisicoquímicos	Mínimo	Máximo	Método Analítico
-------------------------	--------	--------	------------------

Humedad (%)		0.1	A.O.C.S.Ca 2 a -93
Impurezas insolubles (%)		0.000	A.O.C.S.Ca 3 a -93
Acidez Libre (Palmítico) (%)		0.07	A.O.C.S.Ca 5 a -93
Color Lovibond 5 ¼ "(Rojo)		2.5	A.O.C.S.Ca 13 b -93
Índice de Peróxidos (meq O ₂ /kg)		0.8	A.O.C.S.Cd 8 - 96
Índice de Yodo (og l/g)	58	62	A.O.C.S.Cd 1 -93
Contenido de Antioxidante TBHQ (ppm)		35	J.A.O.C.S. Pag 339 1991
Punto de nube (°C)		6.5	A.O.C.S.Cc 6 - 25
Punto de Humo (°C)	218		A.O.C.S.Cc 9 a 93
Sensorial			NA60001
Olor a 40 °C	7.0		
Sabor a 40 °C	7.0		

Fuente: Distribuidor "Fritemos" ubicado en la ciudad de Cali. 2010.

2.2.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DE FRITURA

- ❖ Para los ensayos se utilizó oleína de palma debido a su buena estabilidad a la oxidación (Díaz, 2005).
- ❖ Al usar el aceite por primera vez, se precalentó durante 1 hora (Díaz, 2005) hasta la presión de trabajo.
- ❖ Se usaron rodajas de plátano de 3 mm de espesor, obtenidas con una cortadora ajustadas a 25 mm de diámetro con un sacabocados de acero inoxidable.
- ❖ Se colocaron las muestras en la canastilla de la freidora, la cual tiene una tapa que evita que floten. La relación entre el peso de las muestras y el volumen de aceite fue 6.67 ± 1 g/L (Da Silva y Moreira, 2008).
- ❖ Cuando el aceite alcanzó la temperatura de experimentación respectiva, se cerró el sistema y se hizo vacío hasta obtener la presión de experimentación correspondiente (Da Silva y Moreira, 2008 y Garayo y Moreira, 2002).

- ❖ Se hizo la inmersión de la canastilla lentamente en el baño de aceite, bajando el pivote de sujeción.
- ❖ Se registraron continuamente las temperaturas en el centro de las muestras empleando termocuplas tipo K, hasta alcanzar el tiempo definido. La fritura se finalizó subiendo el pivote de sujeción.
- ❖ En el caso de la fritura a presión de vacío, se realizó un proceso de enfriamiento por dos minutos para escurrir el aceite adherido a las muestras, luego se presurizó lentamente hasta la presión atmosférica.
- ❖ Se sacaron las muestras de la freidora y se almacenaron en bolsas de polietileno para el análisis de calidad respectivo.

2.2.2.1. Consideración especial

El estudio se realizó bajo dos fuerzas térmicas equivalentes (ΔT) definidas. Los valores de las fuerzas térmicas equivalentes se obtuvieron con la Ecuación 18 y se muestran en la Tabla 11 para una presión atmosférica (90 kPa). La temperatura de ebullición del agua en condiciones atmosféricas, en Cali es 97 °C.

$$\Delta T = T_{\text{aceite}} - T_{\text{ebullición}} \quad (18)$$

Tabla 11. Fuerza térmica equivalente a 97 kPa (condición atmosférica)

Temperatura de aceite	ΔT
(°C)	(°C)
140	43
150	53
160	63
170	73
180	83

Las fuerzas térmicas equivalentes escogidas fueron 53 °C y 73 °C. Con el ΔT conocido y la temperatura de ebullición del agua para cada una de las presiones absolutas, se determina, con la Ecuación 18, el valor de la temperatura del aceite, ver Tabla 12.

Tabla 12. Temperatura del aceite para cada presión absoluta definida

Presión absoluta (kPa)	Fuerza térmica equivalente ΔT (°C)	Temperatura de ebullición (°C)	Temperatura del aceite (°C)
30	53	69	122
30	73	69	142
60	53	86	139
60	73	86	159
90	53	97	150
90	73	97	170

2.2.3. MODELADO DE LOS FENÓMENOS DE TRANSPORTE Y DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD EN LA FRITURA POR INMERSIÓN

2.2.3.1. Modelado de la transferencia de calor

El modelamiento de los datos de la temperatura de las rodajas en función del tiempo permitió analizar la influencia de éste en la velocidad de transferencia de calor, considerando que el transporte de energía desde el medio hacia la superficie del sólido es por convección y desde esta superficie hacia el centro del mismo tiene lugar por conducción (Cengel, 2004). La geometría utilizada fue placa circular con espesor de 3 mm y diámetro de 25 mm. La transferencia de calor ocurre axialmente debido a la geometría de la muestra. Para homogenizar el tamaño de las rodajas se utilizó una cortadora de vegetales para el espesor y una plantilla de acero inoxidable (sacabocados) que definió el diámetro, además, se registró la temperatura en el centro de la placa empleando termocuplas tipo K. La modelización de la transferencia de calor se realizó empleando la Ecuación 9.

2.2.3.2. Modelado de la transferencia de humedad

El modelado de los datos de pérdida de humedad de las muestras en función del tiempo permite analizar la influencia del tiempo de proceso sobre la velocidad de deshidratación. Para la modelización de las cinéticas de deshidratación de las láminas de plátano se consideró la misma geometría aplicada para el modelamiento de la transferencia de calor. La modelización de la transferencia de masa se realizó empleando la Ecuación 16.

2.2.3.3. Modelado de la ganancia de aceite

La cinética de absorción de aceite se modeló matemáticamente utilizando la Ecuación 4.

2.2.3.4 Diseño experimental

Para obtener los datos experimentales para la modelación se planteó el siguiente diseño experimental, se establecieron 2 fuerzas térmicas equivalentes, 3 presiones absolutas y 24 tiempos de fritura, como se muestra en la Tabla 13. Los experimentos se realizaron por duplicado. Las dos fuerzas térmicas equivalentes seleccionadas fueron 53°C y 73°C, las tres presiones absolutas se eligieron según el límite máximo de succión de la bomba de vacío y un valor cercano a las condiciones atmosféricas para la ciudad de Cali, los valores establecidos fueron 30 kPa, 60 kPa y 90 kPa y los tiempos se seleccionaron según estudios preliminares en donde se determinó la humedad de equilibrio para cada condición de proceso, eligiendo 20 mediciones cada 15 segundos hasta 5 minutos y 4 más cada minuto hasta completar 9 minutos, los 24 valores de tiempos, en segundos, fueron: 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180, 195, 210, 225, 240, 255, 260, 275, 300, 360, 420, 480 y 540. Las variables respuesta en cada experimento fueron contenido de humedad final, contenido de aceite total, punto de ruptura de la muestra y coordenadas de color (L^* , a^* y b^*) El total de frituras fueron 288 (24 x 12), como se ilustra en la Tabla 13.

Tabla 13. Condiciones de proceso

$\Delta T - i$ (°C)	Presiones Absolutas (kPa)		
	30	60	90
53 – 1	Tiempos	Tiempos	Tiempos
53 – 2	Tiempos	Tiempos	Tiempos
73 – 1	Tiempos	Tiempos	Tiempos
73 - 2	Tiempos	Tiempos	Tiempos

2.2.4. CORRELACION DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD CON LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

2.2.4.1. Determinación del contenido de humedad

Para determinar el contenido de humedad del producto fresco y procesado, se utilizó un horno de convección forzada a 105°C, por 24 horas hasta peso constante y enfriando posteriormente en desecador por media hora. Se efectuó según el método oficial 930.15/90 de la AOAC.

2.2.4.2. Determinación del contenido de grasa

El contenido de grasa de la muestra freída se determinó gravimétricamente por medio de extracción con solvente usando la técnica del soxhlet (A.O.A.C., 1995). Cada análisis se realizó por triplicado.

2.2.4.3. Color

El color de las muestras crudas y procesadas se midió por el método de reflexión con un espectrocolorímetro HunterLab modelo A60-1003-150, con iluminante D₆₅ y un observador de 10° como referencia. A partir de los espectros de reflexión se obtuvieron las coordenadas de color del CIE-La*b*, donde L* es un indicador de la luminosidad, a* (cromaticidad verde (-) a rojo (+)) y b* (cromaticidad azul (-) a amarillo (+)) (Mariscal y Bouchon, 2008).

2.2.4.4. Textura

El análisis de textura del producto frito, se realizó con un texturómetro EZ Test de Shimadzu. La muestra se colocó sobre un soporte de tres puntos de base a una distancia fija entre cada punto, el diámetro del punzón fue de 3 mm y la velocidad de la sonda de 60 mm/min. La validación estadística del protocolo de textura se presenta en el anexo 5. La fuerza máxima de quiebre corresponde al primer punto de inflexión en la curva, la cual, se registra usando el software RheoMeter Software versión 2.05 (Segnini *et al.*, 1999).

2.2.4.5. Análisis estadístico. Superficie de respuesta

1. Fase I. Selección de factores y sus intervalos de variación: Se consideraron tres factores o variables del proceso: presión absoluta (kPa), fuerza térmica equivalente (°C) y tiempo (s); para elegir los niveles de las tres variables se utilizó la estrategia del “centramiento” que consiste en seleccionar el punto central primero y luego seleccionar los valores extremos (Alvarez y Salamanca, 2007), como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Factores y sus intervalos de confianza

Niveles	ΔT (°C)	Presión absoluta (kPa)	Tiempo (s)
0	63	56,5	310
-1	43	38	140
1	83	75	480
Diferencia (1-1)	20	18,5	170

Fase II. Diseño de experimentos: Para aplicar la metodología de superficie de respuestas, se utilizó un diseño compuesto central rotatable con tres factores, el cual se compone de ocho puntos factoriales (2^3), seis puntos axiales y seis puntos centrales (Alvarez y Salamanca, 2007). La matriz de diseño, con los valores de los factores codificados y reales se presenta en la Tabla 15. Las repeticiones en los puntos centrales se usan para estimar el error experimental y permiten estimar el ajuste del modelo de primer y segundo orden (Alvarez y Salamanca, 2007).

Fase III. Trabajo experimental: De acuerdo al plan experimental mostrado en la Tabla 15, se realizaron los tratamientos aleatoriamente. A partir de los resultados se estimaron los parámetros y características de los modelos, haciendo uso de paquetes especializados de estadística (Alvarez y Salamanca, 2007).

Tabla 15. Diseño central compuesto rotatable para tres factores

Tratamiento	Código			Valor real		
	ΔT (°C)	P (kPa)	t (s)	ΔT (°C)	P (kPa)	T (s)
1	-1	-1	-1	43	38	140
2	-1	-1	1	43	38	480
3	-1	1	-1	43	80	140
4	-1	1	1	43	80	480
5	1	-1	-1	83	38	140
6	1	-1	1	83	38	480
7	1	1	-1	83	80	140
8	1	1	1	83	80	480
9	-1,682	0	0	29	59	310
10	1,682	0	0	97	59	310
11	0	-1,682	0	63	24	310
12	0	1,682	0	63	94	310
13	0	0	-1,682	63	59	24
14	0	0	1,682	63	59	596
15	0	0	0	63	59	310
16	0	0	0	63	59	310
17	0	0	0	63	59	310
18	0	0	0	63	59	310
19	0	0	0	63	59	310
20	0	0	0	63	59	310

Fase IV. Ajuste del modelo: Utilizando el software SPSS v 14 se obtuvo la capacidad de ajuste de la ecuación de la superficie de respuesta obteniendo un ANOVA, el cual resumió el cálculo estadístico de la prueba F, que permitió validar el modelo estimado, la importancia de cada uno de los efectos de la superficie de respuesta y la optimización respectiva, para cada variable de respuesta: contenido de humedad, contenido de aceite, textura: dureza y coordenadas de color L^* , a^* y b^* (Alvarez y Salamanca, 2007).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

3.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Con el fin de evaluar la variación de las características físicas y químicas entre variedades de plátanos, con cáscara y pelados, se estandarizó un protocolo de análisis de la materia prima para la agroindustria platanera. Se estudiaron cuatro variedades de plátano: los híbridos FHIA 20 y FHIA 21 y las variedades Dominico Hartón y África. Las fotografías de los racimos, manos, dedos y cortes transversales se presentan en los anexos 6 y 7.

El peso de los racimos completos por variedad y en el número de dedos o plátanos por racimo, se observan en las Figuras 2 y 3, respectivamente. Se puede ver al híbrido FHIA 20 con los valores más altos en ambas figuras, luego se observan las variedades Dominico Hartón y FHIA 21, que no mostraron diferencias significativas estadísticas entre ellas; esto es favorable para el híbrido debido a que además resiste enfermedades como la Sigatoka negra y amarilla, por último se ubica la variedad África. Los coeficientes de variación más bajos en ambas gráficas los presentó la variedad Dominico Hartón, 13.4 % y 8.9 % respectivamente, lo cual confirma los resultados presentados por Herrera y Aristizabal (2003) y Dufour *et al.* (2007) que concluyen que la variedad Dominico Hartón es la más homogénea de 13 variedades estudiadas en cuanto a caracterizaciones físicas, químicas y reológicas.

En lo referente a la distribución de los dedos en cada mano, se puede afirmar que la variedad África posee el mayor porcentaje de dedos en la fila exterior (>84%), correspondiente a la fila que está en contacto directo con el sol; esto ratifica su tendencia a formar una sola fila en la mano, al contrario del resto de variedades que forman dos filas; la variedad Dominico Hartón contiene 68 ± 3 % de dedos y

los híbridos FHIA 20 y FHIA 21 muestran $55 \pm 4\%$ y $61 \pm 3\%$ de plátanos en la fila exterior, respectivamente. Nuevamente no se presentan diferencias significativas entre la variedad Dominico Hartón y el híbrido FHIA 21.

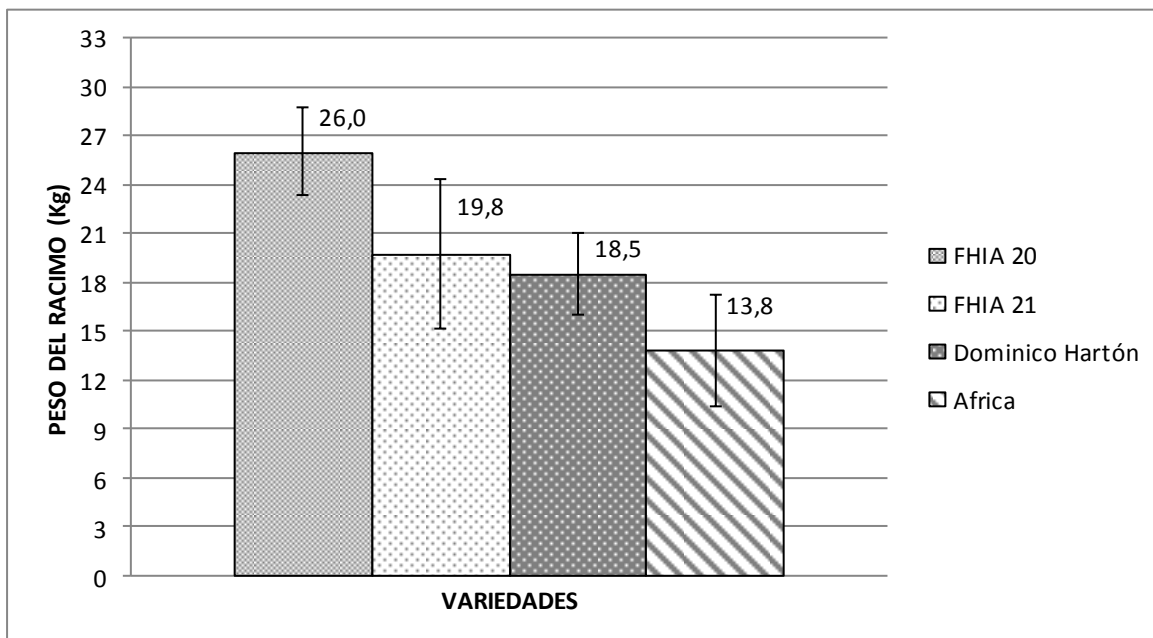


Figura 2. Comparación de variedades de acuerdo al peso

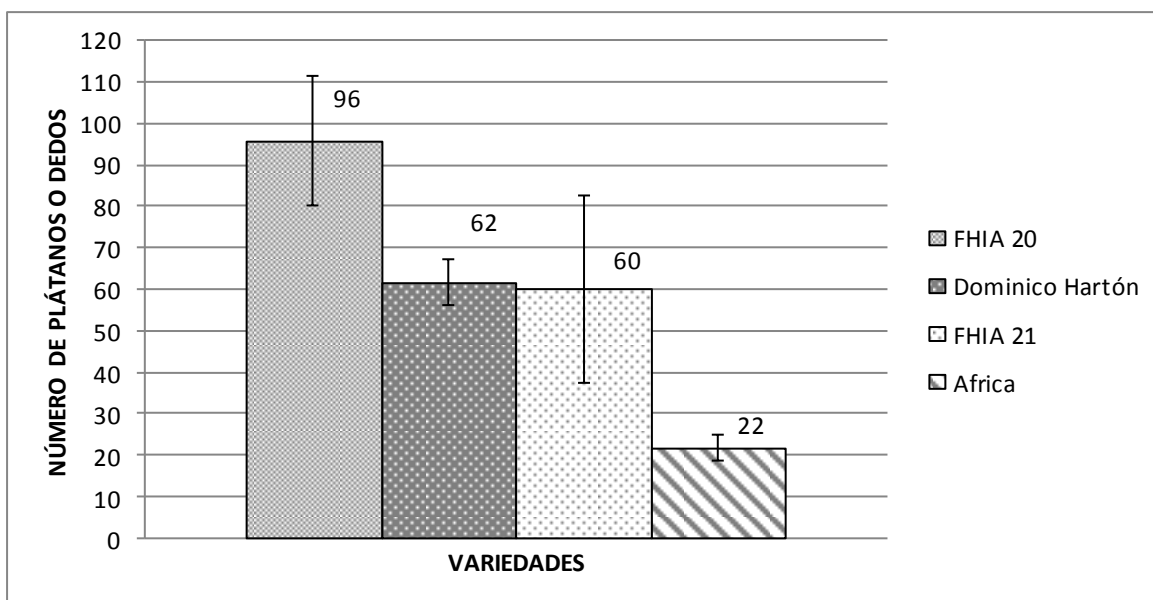


Figura 3. Comparación de variedades de acuerdo al número de dedos

Desde el punto de vista agroindustrial las mejores variedades de plátano son aquellas que presentan el mayor peso por dedo, longitud y diámetro central. En la Figura 4 se presentan los resultados de la evaluación de estos parámetros. Aunque la variedad África presentó éstas características, con peso por dedo de 407.7 ± 112 g, longitud de 29.7 ± 3.9 cm y diámetro central por plátano de 4.9 ± 0.45 cm, no es una variedad muy utilizada debido a problemas en la siembra y en el desarrollo del cultivo, además, al poco peso del racimo y a la poca cantidad de dedos por racimo, a diferencia de la variedad Dominico Hartón, la cual, es la más utilizada a nivel agroindustrial (Arcila, 2002; Dufour *et al.* 2007).

El test de homogeneidad de varianzas y las pruebas Post-anova, para un nivel de significancia de 0,05 %, ratificaron la homogeneidad en las variables físicas en plátanos pelados para las variedades Dominico Hartón, y los FHIA 20 y 21.

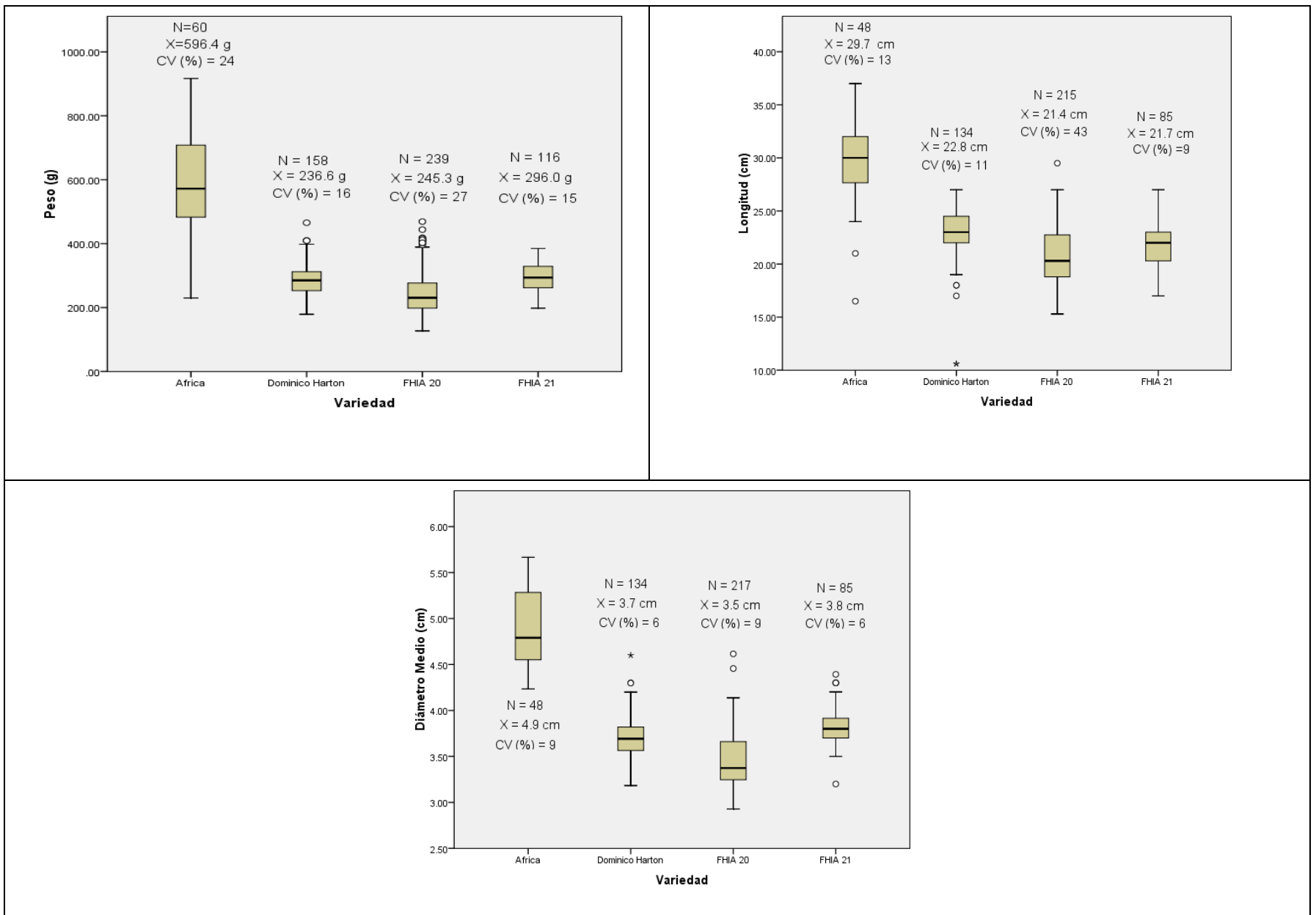


Figura 4. Propiedades físicas de los plátanos pelados

El porcentaje de cáscara es una variable importante para el sector agroindustrial del plátano, debido al sobre costo generado por el transporte, además, de los inconvenientes que puede traer este residuo desde el punto de vista de impacto ambiental. La variedad África presenta el menor porcentaje de cáscara, lo que hace de este plátano una variedad interesante para su consumo industrial, de otro lado, la variedad Dominico Hartón y el híbrido FHIA 21 presentaron comportamiento estadísticamente iguales, a diferencia del híbrido FHIA 20 el cual presenta un porcentaje de cáscara muy alto como se muestra en la Figura 5.

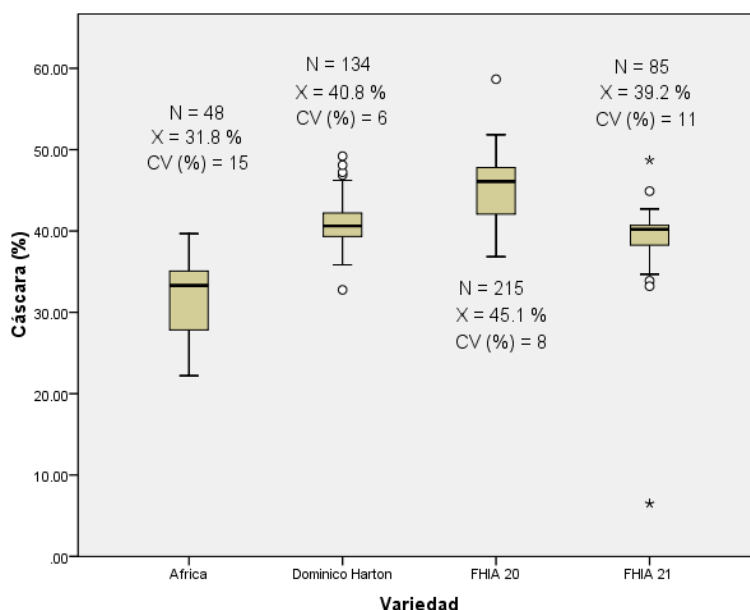


Figura 5. Contenido de cáscara en las variedades de plátano en estudio

El análisis de componentes principales (ACP) se utiliza para reducir la dimensionalidad de las variables que se involucran en el análisis, esto es, expresar en pocas dimensiones (2 ó 3) el comportamiento del fenómeno, partiendo de una cantidad mayor de variables, cada variable equivale a una dimensión. En la Tabla 16 se presentan las características que se utilizaron en el análisis. Un componente es una combinación lineal de todas las variables utilizadas en el análisis. Los resultados de la Tabla 16 muestran los tres componentes explicando el 79% de la variabilidad de las características físicas, y si se toma el cuarto componente se estaría explicando un 98% de la variabilidad de las características físicas de los racimos de plátano.

Adicionalmente, en cada componente se identifican las características que lo resaltan (valores cercanos a 1 o -1). En la Tabla 16 se observa que el primer componente está representado por la longitud del plátano, con y sin cáscara, este componente explica el 29% de la variabilidad. El segundo componente está representado por el peso y el diámetro de los dedos con y sin cáscara, este componente explica el 27% de la variabilidad y el tercer componente está representado por la densidad del plátano y explica el 23% de la variabilidad.

Tabla 16. Matriz de componentes principales aplicada en la caracterización física de plátanos

	COMPONENTE			
	1	2	3	4
Peso racimo	-0,176	-0,137	-0,277	-0,933
Peso dedo con cáscara	0,612	0,661	0,240	0,345
Longitud con cáscara	0,810	0,379	0,163	0,389
Diámetro con cáscara	0,599	0,678	0,257	0,322
Densidad con cáscara	0,261	0,463	0,765	0,243
Peso sin cáscara	0,569	0,676	0,272	0,368
Longitud sin cáscara	0,817	0,429	0,167	0,338
Diámetro sin cáscara	0,536	0,657	0,326	0,414
Densidad sin cáscara	0,015	0,019	0,959	0,223
Contenido de cáscara	-0,350	-0,599	-0,513	-0,467
Varianza explicada (%)	29	56	79	98

Adicionalmente, para evaluar la homogeneidad de la variedad o el híbrido, teniendo en cuenta todas las variables físicas analizadas, se utilizó un análisis multivariado de cluster. Los resultados muestran 6 grupos o cluster. En la Figura 6 se observa que los racimos de la variedad Dominico Hartón quedaron reunidos en un solo grupo con el segundo racimo de África (Africa-2), lo que indica alta homogeneidad en las características físicas de la variedad Dominico Hartón, en un segundo grupo se encuentran los racimos de los híbridos

FHIA 20-2, 20-3 y FHIA 21-2, mientras que los demás racimos de las otras variedades no se mezclaron formando grupos independientes lo que evidencia la heterogeneidad entre las variables físicas de los híbridos y los África.

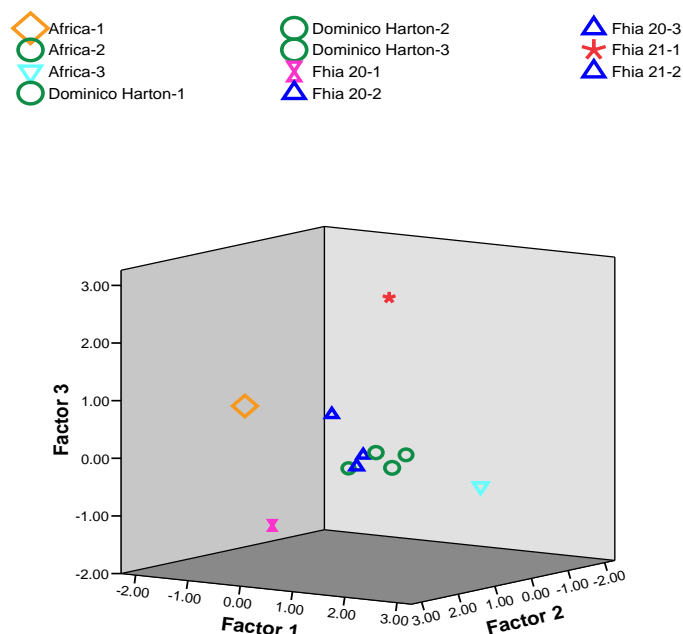


Figura 6. Análisis multivariado de las características físicas de plátanos

3.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MATERIA SECA

Para realizar la caracterización química de cada variedad e híbrido se determinó el contenido de azúcares totales, de azúcares reductores y de almidón. En el análisis presentado en la Tabla 17 se destacan dos grupos, uno con valores altos conformado por la variedad África y el híbrido FHIA 21 y otro con valores bajos constituido por la variedad Dominico Hartón y el híbrido FHIA 21. Los coeficientes de variación en los 4 tipos estudiados fueron altos. El grupo número 1 originaría colores oscuros en la superficie del plátano al someterlo a procesos de fritura por inmersión, debido a una reacción de caramelización producida por altas temperaturas de los aceites ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Fenema, 1996). Además, se encontraron valores similares a los mostrados por Cayon (2000) en la variedad Dominico Hartón para los mismos niveles de maduración (entre 2% y 5% para azúcares

totales y 2% y 4% para los reductores). El contenido de almidón varió desde $86.1 \pm 7.8 \%$ para el Dominico Hartón hasta el $94.3 \pm 4.7 \%$ para el FHIA 21, (ver Tabla 17). El análisis estadístico presentó diferencias significativas a un nivel de significancia del 95% en los dos grupos mencionados anteriormente en las variables azúcar total y reductor, a diferencia de la variable almidón en la que no hubo diferencia estadística en ningún racimo de plátano. Arcila (2002) mostró la misma tendencia en los valores de contenido de almidón en las variedades de estudio analizadas. El encontrar menor valor de almidón en la variedad Dominico Hartón dará como consecuencia menor cantidad de azúcares totales, en su mayoría reductores, (debido a reacciones de caramelización), lo que podría beneficiar el color en el producto final en el proceso de fritura por inmersión (Cayon *et al.* 2000).

Tabla 17. Estadística descriptiva de la caracterización química

Caracterización química	África	FHIA 21	Dominico Hartón	FHIA 20
Azúcares totales (%)	$3,0 \pm 0.81$ a	$3,0 \pm 0.42$ a	$1,3 \pm 0.16$ b	$1,4 \pm 0.14$ b
Coeficientes de variación (%)	27	14	12	10
Azúcares reductores (%)	$2,9 \pm 0.9$ a	$2,3 \pm 0.4$ a	$1,3 \pm 0.23$ b	$0,6 \pm 0.08$ b
Coeficientes de variación (%)	31	17	18	14
Almidón (%) (base seca)	$87,3 \pm 5.2$ c	$94,3 \pm 4.7$ c	$86,1 \pm 7.8$ c	$91,9 \pm 8.3$ c
Coeficientes de variación (%)	6	5	9	9

Letras iguales corresponden a ninguna significancia estadística a un nivel del 95 % de confianza.

En la Figura 7 se observa el comportamiento del contenido de materia seca el cual varió entre $32,4 \pm 1.6 \%$ y $40,3 \pm 2.0 \%$. La variedad Dominico Hartón presenta el mayor contenido de materia seca, lo que representa interés para la industria de los productos fritos que busca los materiales con menor cantidad de agua para disminuir la penetración de aceite en el producto, ya que el agua contenida en el alimento genera pequeños túneles al salir de éste en forma de vapor, lo que ocasiona que el aceite ingrese en etapas posteriores (Pinthus *et al.*, 1995). Los coeficientes de variación para la materia seca en la variedad Dominico Hartón y los híbridos FHIA 20 y FHIA 21 fueron menores a 5 % lo que

implica alta homogeneidad en el racimo, a diferencia de la variedad África que presentó 13 %. El porcentaje de materia seca obtenido concuerda con estudios anteriores obtenidos por Cayón et al. (2000) y Dufour *et al.* (2007). La variedad Dominico Hartón presentó diferencia significativa con los demás híbridos y con la variedad África.

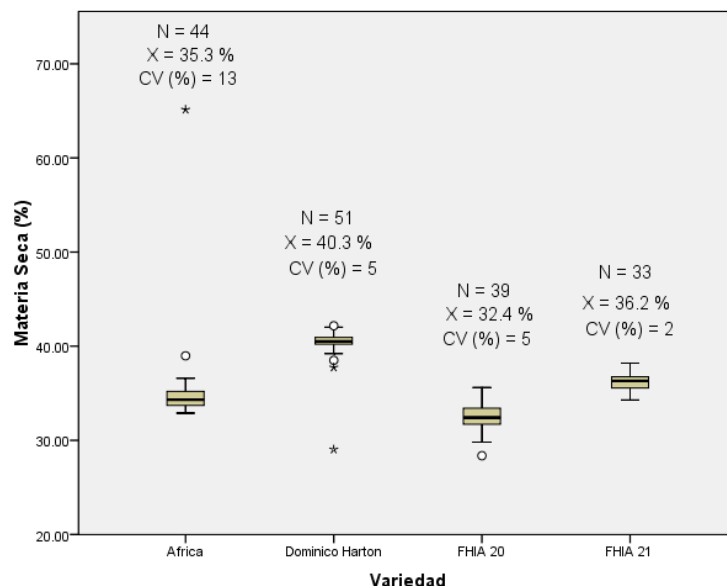


Figura 7. Contenido de materia seca de acuerdo a la variedad

El análisis de componentes principales (ACP) para esta caracterización presentado en la Tabla 18, mostró que el primer componente explica el 47% de la variación y está compuesto por los azúcares totales y reductores, el componente 2 explica el 40% de la variación y está compuesto por los almidones y la materia seca.

Tabla 18. Matriz de componentes principales para las variables químicas

	Componente	
	1	2
Azúcares totales (%)	0,954	0,284
Azúcares reductores (%)	0,981	-0,168
Almidón (%)	0,050	0,884
Materia seca	-0,022	-0,842
Varianza explicada (%)	47	87

En el análisis de conglomerados para la caracterización química y la materia seca presentado en la Figura 8, se obtuvieron 3 grupos: el primero conformado por la variedad Dominico Hartón, el segundo por el híbrido FHIA 20, y el tercero por la variedad África y el híbrido FHIA 21. Las variedades Dominico Hartón y el híbrido FHIA 20 tienen bajos contenidos de azúcares totales y reductores, en comparación con el África y el FHIA 21. La variedad Dominico Hartón se diferencia de las demás debido a que presenta valores bajos de almidón y alto contenido de materia seca para la componente 2.

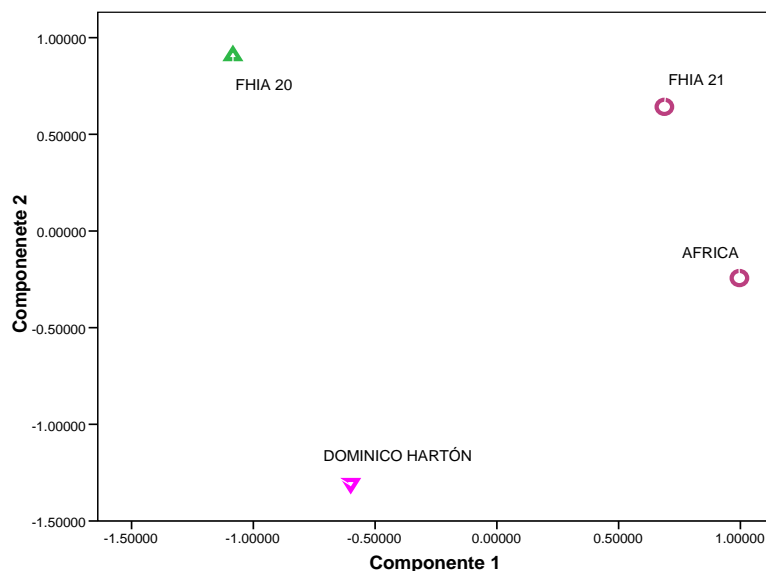


Figura 8. Análisis multivariado de las características químicas y de la materia seca

En la caracterización física sin cáscara de las dos variedades y de los dos híbridos de plátano en estudio, no se observan diferencias significativas entre la variedad Dominico Hartón y su híbrido FHIA 21, lo que realza la importancia del híbrido FHIA 21, debido a que posee valores de las variables físicas, como peso, longitud y diámetro central que no se diferencian de su clon, el Dominico Hartón, cabe mencionar que el análisis multidimensional mostró que la variedad Dominico Hartón tuvo mayor homogeneidad en todo el racimo que su híbrido FHIA 21. En lo que respecta a las variables químicas y al contenido de materia seca (o de humedad) estadísticamente se comportaron diferentes los plátanos en mención, presentando la variedad Dominico Hartón el menor valor en el contenido de humedad y en azúcares totales, situación que reduce la absorción de aceite y

el cambio de color respectivamente, en los procesos de fritura por inmersión (Garayo y Moreira, 2002).

3.2. MODELADO DE LOS FENÓMENOS DE TRANSPORTE Y DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD EN LA FRITURA POR INMERSIÓN

3.2.1. TRANSFERENCIA DE CALOR

En la Figura 9 se pueden observar las etapas de la fritura mencionadas en la sección 1.2.3. La primera etapa (segmento A-B) corresponde al calentamiento del agua de las rodajas desde la condición inicial hasta la temperatura de ebullición respectiva (calor sensible), lo cual ocurre en un tiempo muy corto debido a la diferencia de temperatura con el aceite, luego, continúa la etapa de ebullición superficial del agua en las tajadas de plátano a la presión respectiva (calor latente segmento B-C) y la última etapa se visualiza con un aumento de la temperatura hasta la temperatura del aceite, entre C y D, en éste período se da la formación de la costra (calor sensible) Farkas et al. (1996a).

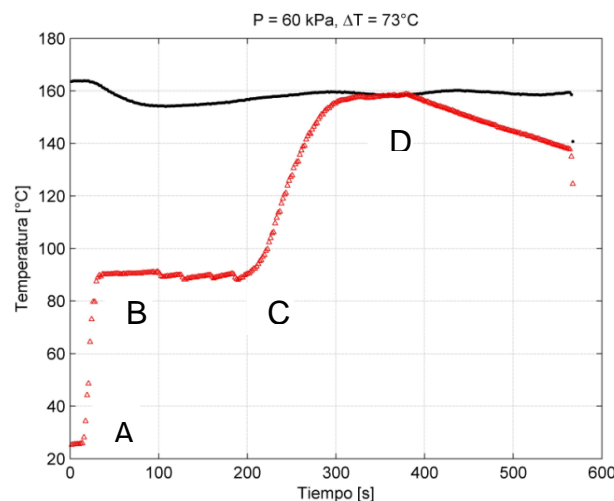


Figura 9. Comportamiento de la temperatura del aceite (línea negra) y del producto (línea roja) durante la fritura

Para el cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor (h), a las distintas condiciones de proceso, se tuvo en cuenta únicamente la etapa de calor latente (ebullición superficial). La Tabla 19 muestra los valores de los coeficientes convectivos de transferencia de calor (h), al variar la presión del sistema, la fuerza térmica y la temperatura del aceite.

Tabla 19. Coeficientes convectivos de transferencia de calor promedio

Presión Absoluta (kPa)	Fuerza térmica equivalente (53°C)		Fuerza térmica equivalente (73°C)	
	Temperatura del aceite (°C)	h (W/m²K)	Temperatura del aceite (°C)	h (W/m²K)
30	122	359,3 ± 71.0 (a)	142	289,4 ± 32.8 (a)
60	139	325,4 ± 55.9 (a)	159	276,5 ± 40.5 (a)
90	150	483.4 ± 78.5 (a)	170	400.3 ± 108.0 (a)

La tendencia mostrada por los coeficientes para una fuerza térmica constante y un aumento en la presión absoluta corresponde a un aumento en el valor del coeficiente, pero al comparar estos datos se encontró que no existe diferencia significativa para las tres presiones (Tabla 19 y Anexo 8), para ninguna fuerza térmica, así mismo, al comparar los valores de los coeficientes para una misma presión y un aumento de la fuerza térmica éstos tienden a disminuir, encontrando que los valores de h son estadísticamente iguales para las dos fuerzas térmicas, esto favorece el uso de temperaturas de aceite más bajas a una misma presión y también el uso de presiones más altas evitando el costo de hacer vacío.

La transferencia de calor se puede explicar a la luz de la formación de la corteza que actúa como un sello que impide la salida del vapor de agua del interior del alimento, por lo tanto, a temperaturas mayores de aceite e igual presión del sistema, se forma la corteza más rápidamente y la velocidad de salida del vapor agua es menor, lo que ocasiona que disminuya la capa límite térmica y por ende el coeficiente de transferencia de calor. Este comportamiento es similar al obtenido por Yildis *et al.* (2006) en papa dulce, Seruga y Budzaki (2005) en masas de krostula y Costa *et al.* (1999) en papas a la francesa, entre otros (ver Tabla 7). Los valores más bajos de h a la misma presión coinciden con las menores resistencias a la transferencia de humedad del interior del alimento al aceite (inverso de la difusividad másica), que ocurren a fuerzas térmicas altas y presiones bajas como se observa en la Tabla 20.

3.2.2. TRANSFERENCIA DE HUMEDAD

La evolución de la relación adimensional de humedad (ψ) de las placas circulares de plátano (25 mm de diámetro y 3 mm de espesor), durante el tiempo del proceso de fritura, para las fuerzas térmicas equivalentes de 53°C y 73°C y para las presiones de 30 kPa, 60 kPa y 90 kPa se presenta en la Figura 10. En cada figura se observa la etapa decreciente de una curva típica de secado, las otras etapas que anteceden a ésta no se evidencian debido a la alta velocidad de salida del agua. Math *et al.* (2004) presenta curvas típicas similares. El modelo estadístico completo se presenta en el anexo 9.

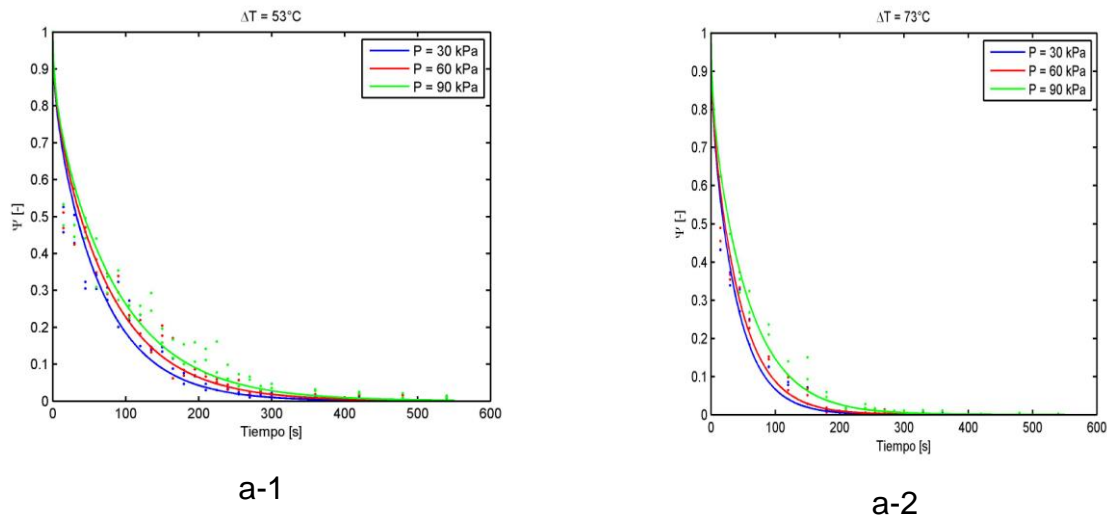


Figura 10. Variación de la humedad adimensional de las placas circulares de plátano con el tiempo (s) para dos fuerzas térmicas y tres presiones absolutas. (Puntos son datos experimentales y líneas corresponden al modelo difusional).

En las Figuras 10a-1 y 10a-2 se puede observar que al disminuir la presión, a un valor constante de tiempo, para cualquier valor de fuerza térmica se disminuye también la humedad adimensional, aumentando la velocidad de secado, lo que favorece menores tiempos de exposición del producto en el baño de aceite caliente. La principal causa para que ocurra este comportamiento es debida a la menor temperatura de ebullición que se debe alcanzar a menores presiones, estos resultados coinciden con los de otros autores con diferentes materias primas (Garayo y Moreira, 2002; Liu-Ping *et al.*, 2005a; Shyu *et al.*, 2005). Cabe añadir que al aplicar el análisis estadístico respectivo, la humedad

adimensional, no presentó significancia, lo que puede ser explicado a la luz de una presión de vacío alta (30 kPa), muy diferente a la presenta por los autores antes mencionados.

En la Tabla 20 se muestran los tiempos necesarios para alcanzar una concentración adimensional de 0.01 para las distintas condiciones de proceso cuando se utilizan presiones bajas el tiempo necesario es menor que cuando se usan presiones altas a la misma fuerza térmica, debido a que la temperatura de ebullición del agua es menor; el tiempo en mención se puede disminuir aún más, si se aumenta la fuerza térmica a la misma presión, debido al aumento de la velocidad de ebullición por una mayor temperatura del aceite.

Tabla 20. Tiempo de fritura necesario para alcanzar una humedad adimensional menor de 0.01

P (kPa)	ΔT (°C)	T aceite (°C)	T de ebullición(°C)	t (s)
30	53	122	69	300 a
30	73	142	69	180 b
60	53	139	86	360 c
60	73	159	86	200 b
90	53	150	97	480 d
90	73	170	97	270 e

Letras iguales corresponden a ninguna significancia estadística a un nivel del 95 % de confianza.

Los valores de difusividad efectiva calculados aplicando el modelo difusivo propuesto en la Ecuación 16 se muestran en la Tabla 21. Estos valores se ajustaron a la ecuación tipo Arrhenius (Ecuación 3) para determinar la energía de activación para cada presión de trabajo.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 21, se puede afirmar que al mantener una presión constante y aumentar la fuerza impulsora (temperatura del aceite), la difusividad se incrementa, como lo muestran Moyano y Berna (2002), Math *et al.* (2004) y Yildis *et al.* (2006) en tajadas de papa y Bravo *et al.* (2008) en manzana (ver Tabla 8). Al

mismo tiempo para una fuerza térmica fija al disminuir la presión, la difusividad efectiva aumenta, lo cual se relaciona con resistencias internas a la transferencia de masa pequeñas, esto concuerda con Reid *et al.* (1997), y es debido a la disminución del punto de ebullición a menores presiones, a las cuales el agua no ligada inicia su evaporación más rápidamente.

Tabla 21. Difusividad efectiva a distintas condiciones de proceso

P (kPa)	ΔT (°C)	T aceite (°C)	Difusividad efectiva x 10⁹
30	53	122	13,4 ± 2,5 a
30	73	142	22,8 ± 4,1 b
60	53	139	11,6 ± 2,0 a
60	73	159	20,3 ± 3,9 b
90	53	150	10,3 ± 2,0 a
90	73	170	15,6 ± 2,2 b

Letras iguales corresponde a significancia estadística a un nivel del 95 % de confianza.

En cuanto a la energía de activación (E_a), los valores obtenidos fueron 43.9 kJ/mol ± 4.2, 38 kJ/mol ± 2.5 y 34.5 kJ/mol ± 3.5 para presiones de 60 kPa, 30 kPa y 90 kPa respectivamente sin embargo, no se encontró una diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) entre los valores de energía de activación calculados, lo cual muestra la independencia de la presión con la energía de activación.

3.2.2.1. Validación del modelo

Para comprobar la validez del modelo se graficó la humedad adimensional calculada vs la humedad adimensional experimental (Figura 11), para todas las condiciones de proceso, el resultado un coeficiente de correlación de 0.90, lo cual indica la validez del modelo de pérdida de humedad.

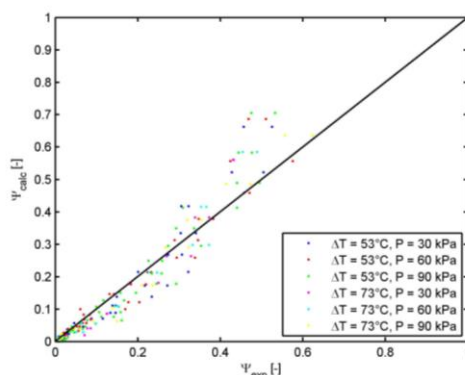
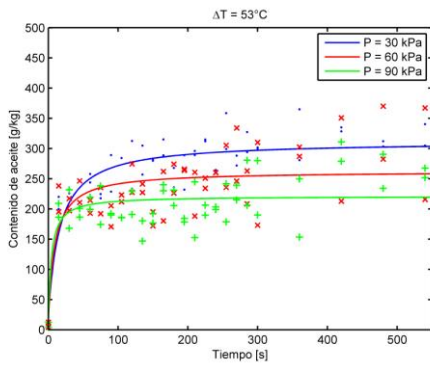


Figura 11. Validación del modelo difusional en la fritura de rodajas de plátano

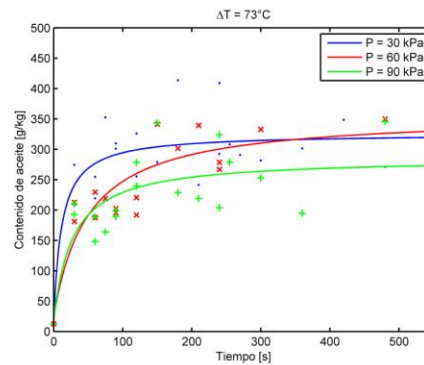
3.2.3. ABSORCIÓN DE ACEITE DURANTE LA FRITURA

En la Figura 12 se muestra la variación del contenido de aceite durante la fritura de las rodajas de plátano, para las fuerzas térmicas equivalentes de 53 °C y 73 °C y presiones de 30 kPa, 60 kPa y 90 kPa. Para modelar la cinética de absorción de aceite se utilizó la Ecuación 4. En el anexo 10 se presenta la validación del modelo estadístico para las diferentes presiones y fuerzas térmicas equivalentes.

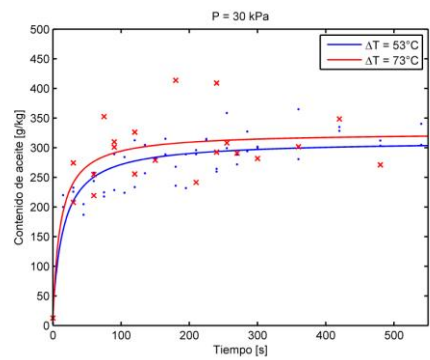
En las Figura 12a, se puede observar la tendencia a aumentar el contenido de aceite al disminuir la presión manteniendo constante la fuerza térmica, esta misma tendencia se puede observar al aumentar la fuerza térmica manteniendo la presión del sistema constante (Figuras 12b), esto es debido a que la costra superficial se desarrolla rápidamente a mayores temperaturas de aceite, ocasionando que mayor cantidad de vapor de agua quede atrapado al interior de la rodaja de plátano originando que aumente el volumen del producto lo que a su vez acrecienta el espacio que puede ocupar el aceite en la etapa de enfriamiento, tal como lo indican algunos autores (Gamble *et al.*, 1987; Baumann y Escher, 1995; Krokida *et al.*, 2000a; Liu-Ping *et al.*, 2005a; Shyu *et al.*, 2005). La costra favorece la absorción de aceite; pues con ella se disminuye la hidrofiliicidad en la superficie del producto (Baumann y Escher, 1995), esto se corrobora con los resultados de textura Figura 13.



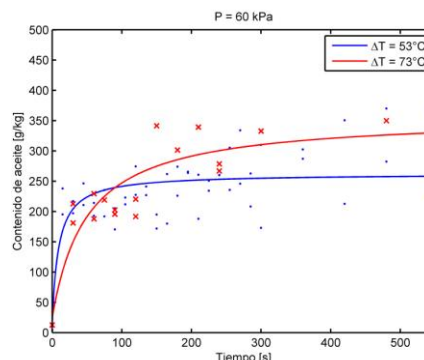
a-1



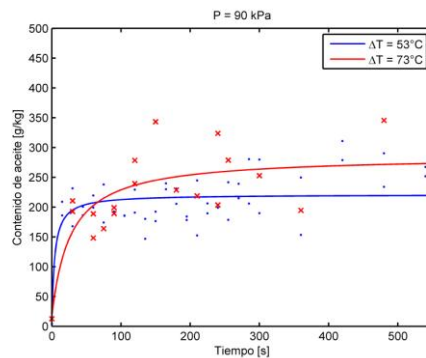
a-2



b-1



b-2



b-3

Figura 12. Variación del contenido de aceite de trozos de plátano con el tiempo, para dos fuerzas térmicas equivalentes y una presión absoluta. (Los puntos son los datos experimentales y las líneas son obtenidas con el modelo).

La velocidades de absorción de aceite, representadas en las pendientes de las curvas de las Figuras 12 y calculadas en la Tabla 22, presentan menores valores a fuerzas térmicas altas (73 °C), sin presentar significancia estadística, a diferencia, cuando se disminuye la fuerza térmica a 53 °C en la cual aumentó la velocidad de absorción con diferencia estadística.

En la Tabla 22 se presentan los valores del tiempo necesario para alcanzar el contenido de aceite en equilibrio en las muestras de plátano, allí se observa que para una misma presión, el tiempo de proceso aumenta con el aumento de la fuerza térmica equivalente y por ende la temperatura del aceite, excepto de 30 kPa que presenta valores estadísticamente iguales. Diversos estudios (Moreira *et al.*, 1995b, Saguy y Pinthus, 1995, Garayo y Moreira, 2002 y Liu-Ping *et al.*, 2005a) han demostrado que la mayor parte del aceite penetra en el producto al extraerlo del baño de aceite, cuando el producto se está enfriando y no, durante la fritura por inmersión.

Tabla 22. Comparación del contenido de aceite en equilibrio

P (kPa)	ΔT (°C)	T aceite (°C)	Contenido de aceite (g/kg) b.s.	Tiempo (s)	Velocidad de absorción de aceite (g/(kg s)
30	53	122	290	200 a	1.5 a
30	73	142	300	190 a	1.6 a
60	53	139	240	130 b	1.7 b
60	73	159	300	220 a	1.4 a
90	53	150	210	50 c	4.2 c
90	73	170	270	200 a	1.4 a

Letras iguales corresponde ninguna significancia estadística.

Al relacionar los tiempos para lograr el equilibrio en el contenido final de humedad, Tabla 20 y en el contenido final de aceite, Tabla 22, es posible visualizar que para todas las condiciones de operación el tiempo para alcanzar el contenido de humedad en equilibrio fue mayor al tiempo necesario para obtener el contenido de aceite en equilibrio. Adicionalmente el análisis estadístico mostró una diferencia significativa al utilizar una fuerza térmica de 53 °C para las tres presiones, comportamiento diferente con otra fuerza térmica.

3.2.4. TEXTURA (FRAGILIDAD)

Los datos experimentales y el modelo matemático aplicado a la fragilidad del material, en representación de la textura del mismo, se muestran en la Figura 13. En general, el comportamiento de la fragilidad muestra un aumento durante los primeros tres minutos de

fritura, sin embargo, los datos presentan alta variabilidad (existen datos con diferencias hasta 20 ± 12 N en las mismas condiciones de fritura). Los resultados a 30 kPa en ambas fuerzas térmicas presentan un máximo claramente definido, aunque para las otras dos presiones y ambas fuerzas térmicas, se pueden observar datos apreciablemente más dispersos que dificulta una conclusión en la tendencia.

Con el objeto de evaluar estadísticamente este efecto se propuso una regresión mediante un modelo matemático no lineal basado en comportamientos cinéticos que incluyen términos monótonamente crecientes y decrecientes que permitan discernir sobre este punto. La información estadística del modelamiento se presenta en el anexo 11.

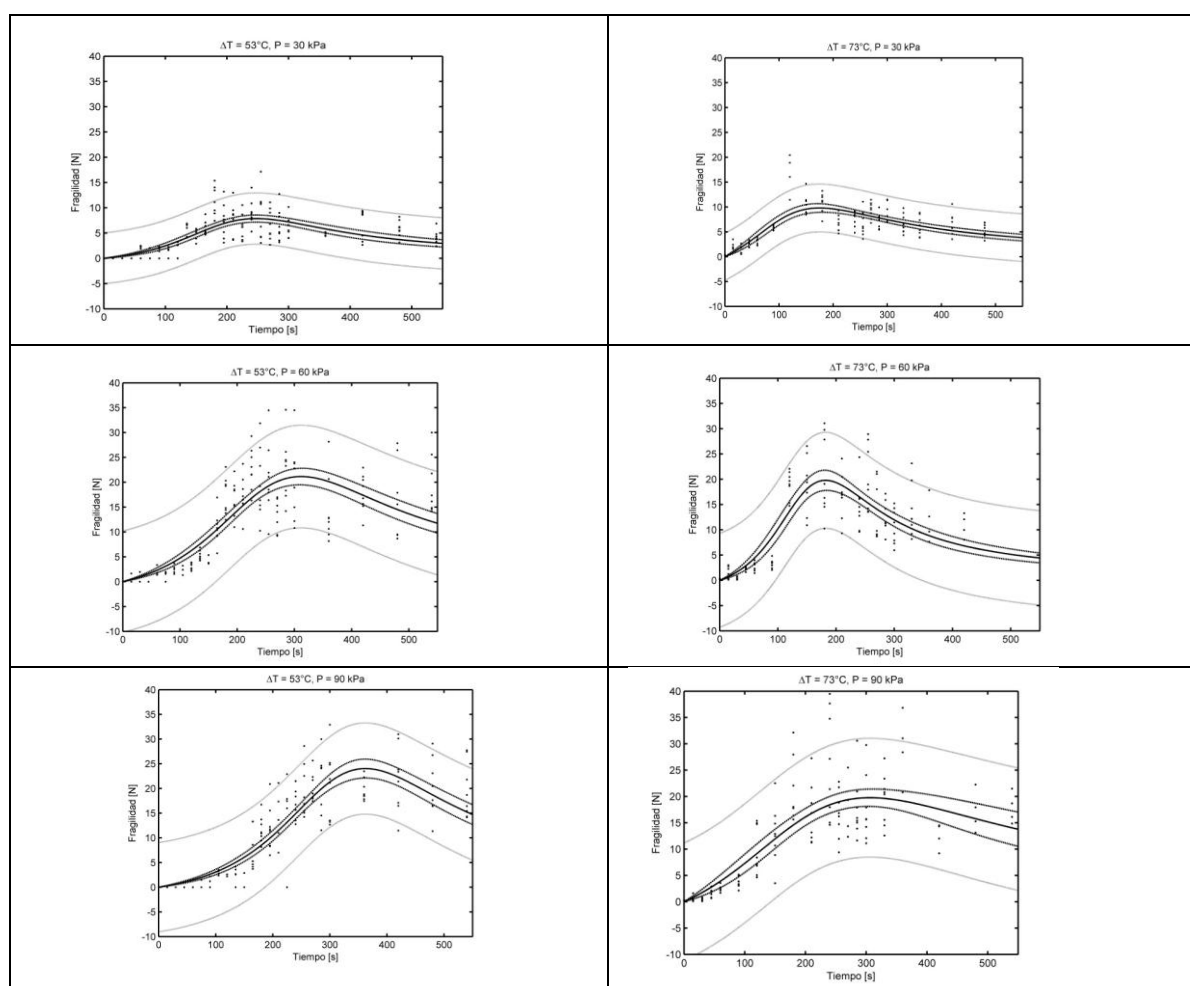


Figura 13. Efecto de las condiciones de fritura sobre la fragilidad de la muestra. La línea central continua corresponde a la predicción del modelo, las dos líneas siguientes pertenecen al intervalo de 95% de confianza, las dos líneas claras siguientes corresponden al intervalo de 95% confianza donde se encontrarían nuevas observaciones

En el modelo matemático utilizado el término cuadrático en el denominador supone el mencionado descenso, de acuerdo a la Ecuación 19. Si el parámetro β_3 no resulta significativo, el modelo presenta una tendencia monótonamente creciente con un límite cuando $t \rightarrow \infty$.

$$F = \frac{t}{\beta_1 + \beta_2 t + \beta_3 t^2} \quad (19)$$

En la Figura 13 se presenta el resultado de la regresión del modelo, el cual presenta un ajuste adecuado, incluyendo dentro de los límites de confianza un mayor número de datos, y explica de manera confiable la variación de los datos experimentales. El ANOVA para la regresión no-lineal del modelo propuesto en las diferentes condiciones de operación de la fritura puede observarse en el Anexo 11, y los valores de F y p confirman la significancia del uso del modelo. Las variaciones se deben posiblemente a la cosecha de los racimos en distintos períodos de tiempo, la fritura de plátanos escogidos en distintas manos del racimo, el deterioro del aceite o la diferencia en el tiempo de medición de la textura.

En la Figura 13 se evidencia que para una fuerza guía de 53°C, el punto de quiebre máximo aumenta a medida que lo hace la presión, (5, 20 y 23 N para 30, 60 y 90 kPa), además, se aumenta el tiempo en donde se alcanza el máximo (220; 300 y 350 s respectivamente). En igual sentido se observa para la fuerza guía de 73 °C, (10; 20 y 21 N para 30; 60 y 90 kPa) aunque se reduce el tiempo para alcanzar el máximo 180; 200 y 300 s respectivamente. El comportamiento encontrado guarda la misma tendencia que el presentado por Garayo y Moireira (2002), Granda *et al.* (2004) y Fan *et al.* (2005); quienes afirmaron que al aumentar la temperatura del aceite la fuerza de quiebre también lo hace, y que cuando aumenta el nivel de vacío la fragilidad disminuye, estos resultados los consiguieron fritando papa los dos primeros autores y en zanahorias Fan *et al.* (2005).

3.2.5. COLOR

Para la evaluación estadística de las tendencias de los datos experimentales de las coordenadas de color L^* , a^* y b^* se propuso un modelo matemático cuadrático, basándose en el comportamiento cinético. Los datos de las coordenadas de color L^* y a^* sugieren la posibilidad de permanecer constantes durante el tiempo de fritura para algunas

condiciones, y con ligeras desviaciones lineales, con lo que un modelo polinómico de segundo orden (Ecuación 20) es suficientemente adecuado para explicar la tendencia y evaluar el efecto que el tiempo logra sobre ellas, además de indicar los casos donde la curvatura es significativa.

$$Color = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 \quad (20)$$

En este modelo, un valor de β_2 no significativo estadísticamente, indica que la coordenada de color sólo presenta tendencias monótonamente crecientes o decrecientes en forma lineal (proporcional o inversamente proporcional). Adicionalmente, un valor de β_1 no significativo indica que la coordenada de color no se afecta con el tiempo de fritura, ver Anexo 12 y Tabla 23.

Tabla 23. Síntesis de la validación estadística para las coordenadas de color

ΔT °C	Presión kPa	β_0	p-valor	β_1	p-valor	β_2	p-valor
Coordenada L*							
53	30	54.80	0.0	X	0.9	X	0.3
	60	50.22	0.0	-0.01	0.0	X	1.0
	90	52.89	0.0	0.04	0.0	X	1.0
73	30	51.45	0.0	X	0.17	X	0.9
	60	57.61	0.0	X	0.5	X	0.9
	90	59.69	0.0	2E-2	0.01	X	1.00
Coordenada a*							
53	30	7.5	0.0	0.005	0.04	X	0.7
	60	10.31	0.0	X	0.55	X	0.10
	90	10.06	0.0	X	0.12	X	0.055
73	30	7.66	0.0	0.008	5.7E-5	X	0.98
	60	11.34	0.0	X	1.0	3.5 E-5	5.6E-5
	90	9.95	0.0	8 E-6	3.9E-4	X	0.18
Coordenada b*							
53	30	21.18	0.0	0.08	0.0	X	1.0
	60	22.51	0.0	0.16	0.0	X	1.0
	90	29.58	0.0	0.14	0.0	X	1.0
73	30	27.71	0.0	0.11	0.0	X	1.0
	60	29.59	0.0	0.16	0.0	X	1.0
	90	33.59	0.0	0.13	0.0	X	1.0

Significancia del efecto (aparece el valor). No significancia del efecto (aparece una X).

El comportamiento de la coordenada de color L^* se muestra en la Figura 14.

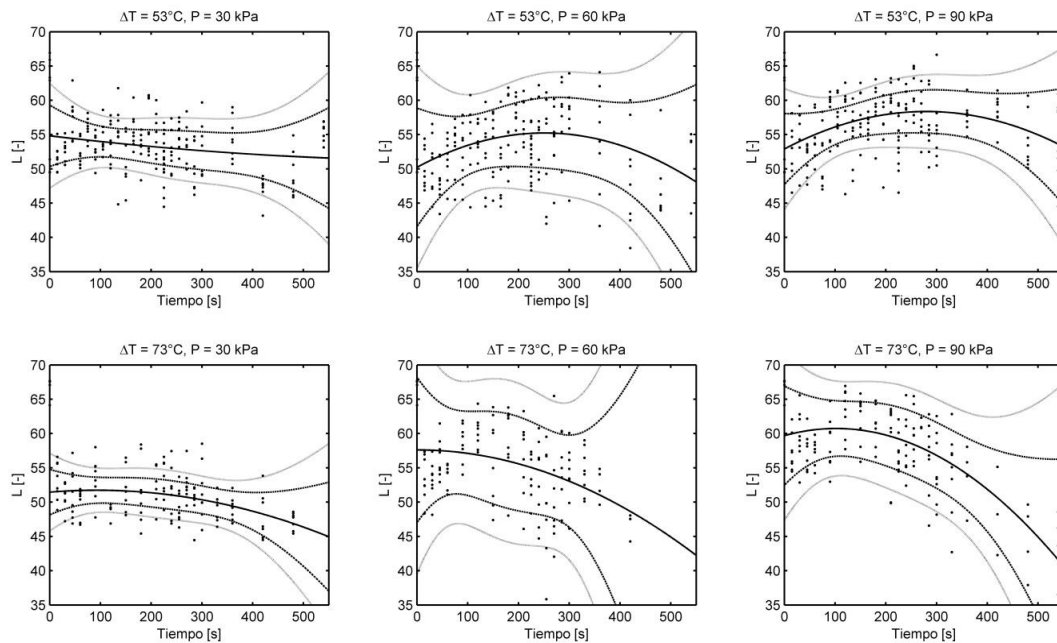


Figura 14. Variación de la coordenada de color L^* de las tajadas fritas de plátano con el tiempo (s). (Puntos son datos experimentales y las líneas continuas corresponden a la predicción del modelo, la línea punteada al intervalo de 95% de confianza del valor obtenido por la curva, la línea clara al intervalo de 95% de confianza donde se encontrarían nuevas observaciones)

Se puede resaltar que los datos obtenidos con una fuerza térmica de 73°C tienen tendencia a descender ligeramente y de manera lineal indicando una proporcionalidad inversa respecto del tiempo, y esta tendencia parece marcarse con el aumento en la presión. Sin embargo, los datos obtenidos a 53°C parecen sugerir que el valor no cambia durante la fritura. También vale la pena anotar que los valores de ésta coordenada para tiempos menores a 100 s no corresponden a la tendencia mostrada para tiempos mayores, lo cual puede ser debido a la variabilidad en la materia prima, además, se observa que los intervalos de confianza no tienen un comportamiento monótono siguiendo la curva de regresión mediante el modelo polinómico, lo que sugiere que en la mayoría de los casos parece no ajustar adecuadamente los datos experimentales o que algunos parámetros del modelo pueden no ser significativos.

Los datos correspondientes a la coordenada de color a^* se presentan en la Figura 15.

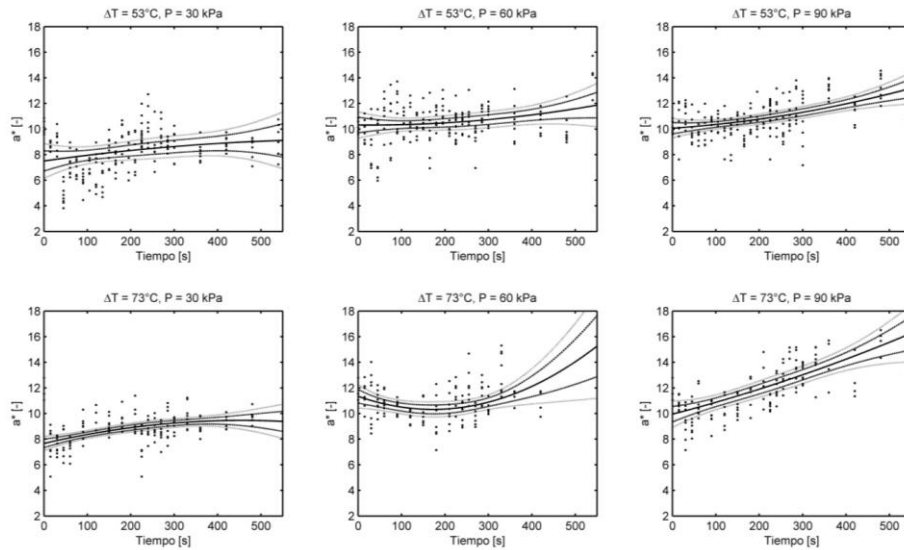


Figura 15. Variación de la coordenada de color a^* de las tajadas fritas de plátano con el tiempo (s) (Puntos son datos experimentales y las líneas continuas corresponden a la predicción del modelo, la línea punteada al intervalo de 95% de confianza del valor obtenido por la curva, la línea clara al intervalo de 95% de confianza donde se encontrarían nuevas observaciones)

Estos datos también sugieren valores relativamente constantes a 53°C, sin embargo, a 73°C se observa un aumento lineal del valor de la coordenada de color con el tiempo, e igual que para la coordenada L^* , el aumento de la presión en la fritura parece acrecentar el aumento de esta coordenada, pero con poca variación.

Por su parte, los datos correspondientes a la coordenada b^* se muestran en la Figura 16. Para estos valores se observa una clara tendencia curva en los datos, aunque esta vez, el efecto es claro con ambas fuerzas guía, y de nuevo, el efecto parece acentuarse con el aumento de la presión, indicando la presencia de un tiempo donde ocurre un máximo y luego un descenso en los valores. En la Tabla 23 se muestran los resultados de las regresiones para la coordenada b^* a las condiciones de fuerza térmica y presión evaluadas. En esta Figura se observa que los intervalos de confianza tienen un comportamiento monótono siguiendo la curva de regresión mediante el modelo polinómico, encerrando la mayor cantidad de datos, lo que sugiere que en la mayoría de los casos

parece ajustar adecuadamente los datos experimentales y que algunos parámetros del modelo pueden ser significativos.

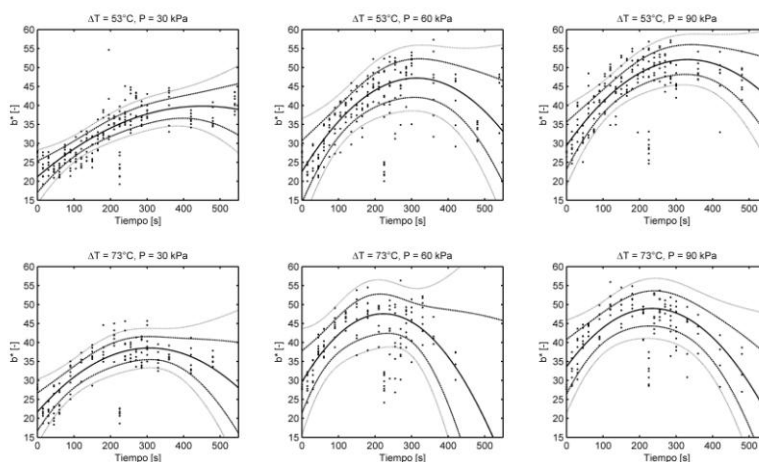


Figura 16. Variación de la coordenada de color b^* de las tajadas fritas de plátano con el tiempo (s) (Puntos son datos experimentales y las líneas continuas corresponden a la predicción del modelo, la línea punteada al intervalo de 95% de confianza del valor obtenido por la curva, la línea clara al intervalo de 95% de confianza donde se encontrarían nuevas observaciones)

Respecto al análisis estadístico para la coordenada b^* para ambas fuerzas guía y todas las presiones, se encontró que la regresión es significativa como lo indica sus valores de p , además, las regresiones son de buena calidad debido a que la suma de cuadrados correspondiente a la falta de ajuste del modelo es mucho mayor a la suma de cuadrados de las réplicas. Existe una relación entre las coordenadas L^* , a^* y b^* , debido a reacciones de oscurecimiento no enzimático (caramelización y Maillard), las que producen compuestos cromóforos, además podrían presentarse también compuestos coloreados por la degradación de las leucoantocianinas (taninos), fenómeno que ocurre durante procesos de manipulación y transformación, por lo que se disminuye el parámetro L^* , haciendo las muestras menos luminosas. Los compuestos que otorgan color pueden ser cafés o amarillos oscuros, tal vez tonalidades rojizas, de ahí el aumento de a^* y b^* (Fenema, 1996). Los resultados guardan alguna relación con la bibliografía presentada, Fan *et al.*, (2005), Garayo y Moreira (2002), Granda *et al.*, (2004) y Shyu y Hwang (2001), para chips de zanahorias, papas y manzanas respectivamente.

3.3. CORRELACION DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD CON LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros de calidad: contenido final de humedad, contenido final de aceite, textura o fragilidad o punto de quiebre y color (coordenadas L^* , a^* y b^*).

Para hacer el ajuste del modelo, tuvo en cuenta:

- ❖ Capacidad de ajuste del modelo.
- ❖ Evaluación de los efectos del modelo.
- ❖ Optimización de cada superficie.
- ❖ Optimización general.

La significancia de cada efecto en las variables de salida se presenta en la Tabla 24. Los efectos ΔT , t , ΔT^2 , t^2 y su interacción ΔT^*t , son significativos para el contenido final de humedad, las coordenadas de color L^* y b^* y la textura. Se observó que los efectos en donde aparece la presión afectaron significativamente las coordenadas de color L^* y b^* . La optimización en forma individual de las variables de salida deja un máximo en b^* y un punto de silla en las demás variables.

Tabla 24. Análisis de ajuste del modelo

Significancia del modelo	Significancia de cada efecto										Optimización	
	P< 0.05											
		Individuales					Cuadráticos					
	R ²	Cte	ΔT	P	t	ΔTP	ΔTt	Pt	ΔT ²	P ²	t ²	
Contenido de humedad	0.95	X	X		X		X		X		X	P.S.
Contenido de aceite	0.80	X										P.S.
Coordenada de color L*	0.93	X	X	X	X	X	X	X	X		X	P.S.
Coordenada de color b*	0.91	X	X	X	X	X	X	X	X		X	Máx
Coordenada de color a*	0.68	X	X				X		X			P.S.
Textura: Fragilidad	0.87		X		X		X	X			X	P.S.

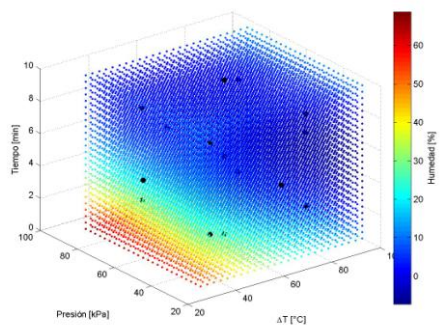
P.S: punto de silla y Máx: punto máximo

De acuerdo a este análisis, la optimización general del modelo, dio como resultado unas condiciones de proceso de 72.7 kPa para la presión, 6.1 min para el tiempo y 57.4 °C para la fuerza térmica equivalente, el factor de deseabilidad para esta combinación fue de 0.89.

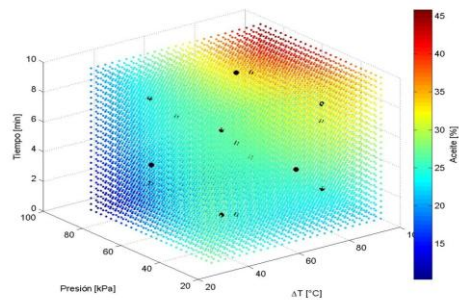
Las superficies de respuesta para las tres variables de control y los contenidos finales de humedad (izquierda) y de aceite (derecha) se presentan en la Figura 17. Otros autores (Shyu y Hwang, 2001; Garayo y Moreira, 2002; Granda et al., 2004; Fan et al., 2006; Fan et al., 2005; Troncoso et al., 2007; Mariscal y Bouchon, 2008 y Da Silva y Moreira, 2008) han presentado valores por debajo de 3% en el contenido final de humedad y entre 26% y 38% en el contenido final de aceite en distintos productos fritos.

En la Figura 17 se pueden observar bajos contenidos finales de humedad ($<4\%$) y de aceite ($< 22 \%$) representados con el color azul oscuro. La humedad baja se consigue a cualquier presión, a fuerzas térmicas altas y a tiempos mayores de tres minutos, a diferencia del contenido de aceite bajo que sólo se alcanza a presiones altas, fuerzas térmicas bajas y tiempos bajos, corroborando los resultados de la sección 3.2. Tablas 19 y 21. En la Figura 17b-1, se identifica la independencia del contenido final de humedad con la presión del sistema, como lo ratifica el análisis del ajuste del modelo (Tabla 24); entre tanto, los menores valores del contenido final de aceite se consiguieron a presiones superiores de 80 kPa (Figura 17b-2). Al analizar los cortes a fuerza térmica constante (Figuras 17c-1 y 17c-2), se observa un comportamiento contrario para la humedad y el aceite, ya que se pueden conseguir valores de humedad $< 4\%$, para fuerzas térmicas mayores a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ en tiempos mayores a 3 minutos, distinto comportamiento se observa en el contenido final de aceite, el cual debe utilizar fuerzas térmicas menores a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ en tiempos menores a 2 minutos, para alcanzar valores inferiores a 20% . Este comportamiento corrobora la teoría de Garayo y Moreira (2002) que aseguraron que los sitios dejados por el vapor de agua que sale del alimento cuando se emplean altas fuerzas térmicas se ocupan por el aceite adsorbido en la etapa de enfriamiento, por tal motivo entre mayor sea la fuerza térmica mayor será la cantidad de agua en ebullición que sale y mayor es la cantidad de aceite que ingresa debido a los túneles dejados por el vapor de agua.

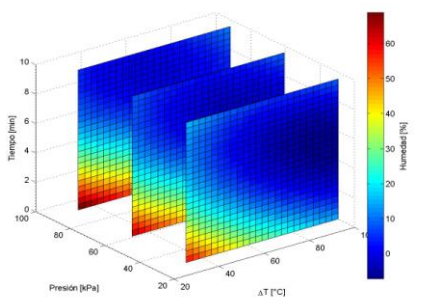
El color debe evaluarse en combinación con todas las coordenadas que lo representan (L^* , b^* y a^*). Para el caso de tajadas fritas de plátano se busca favorecer las combinaciones del color amarillo ($b^*>45$), con brillos intermedios ($55<L^*<65$) y muy poca variación entre verde y rojo ($0<a^*<20$).



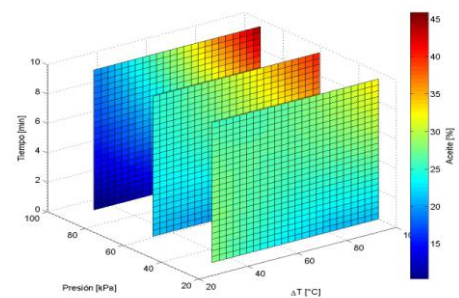
a-1



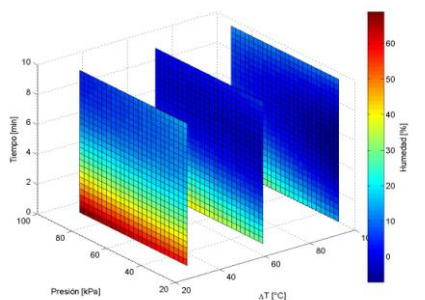
a-2



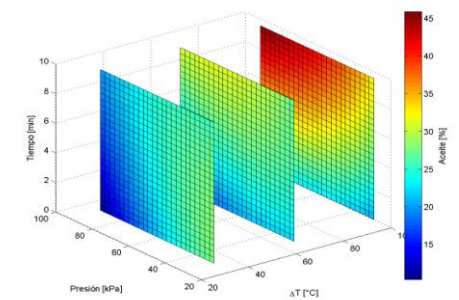
b-1



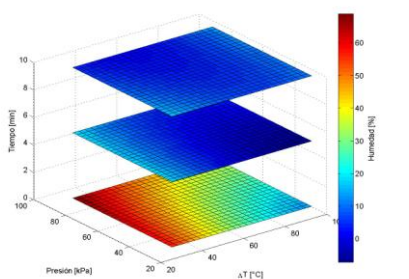
b-2



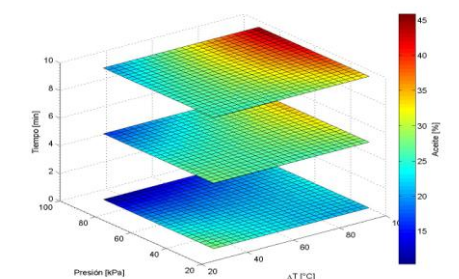
c-1



c-2



d-1



d-2

Figura 17. Superficies de respuesta y cortes para los contenidos de humedad y de aceite.

a) Superficie de respuesta, b) P constante, c) ΔT constante, d) t constante

Las superficies de respuesta para las tajadas fritas de plátano para las tres variables de control y las coordenadas de color se muestran en la Figura 18, para L^* (izquierda), b^* (centro) y a^* (derecha). Diversos autores (Shyu y Hwang, 2001; Garayo y Moreira, 2002; Granda et al., 2004; Fan et al., 2006; Fan et al., 2005; Troncoso et al., 2007; Ikoko y Kuri, 2007, Mariscal y Bouchon, 2008 y Da Silva y Moreira, 2008) muestran valores de éstas coordenadas para zanahoria, papa, manzana y plátano. En estos estudios concluyen que las coordenadas de color L^* , b^* y a^* no tienen un comportamiento definido para todos los productos fritos, debido a la diferencia entre las composiciones de las materias primas utilizadas. En la Figura 18 se pueden observar los valores intermedios de la coordenada L^* ($55 < L^* < 65$) y los valores de $b^* > 45$ con colores rojo oscuro, y la variación en la coordenada $a^* < 18$ con el color azul oscuro. Este conjunto de valores se consiguen para presiones altas, fuerzas térmicas bajas y tiempos largos, así mismo con, fuerzas térmicas altas para tiempos bajos. La dependencia de las variables control con las coordenadas L^* y b^* se presenta en la Tabla 24, mostrando igual comportamiento para las dos coordenadas, esto se corroboró en la Figura 18.

En los cortes de presión (Figuras 18b-1 y 18b-2), se observan los valores deseados de L^* y b^* (rojo oscuro) cuando la presión utilizada supera los 70 kPa lo contrario ocurre para la coordenada a^* (Figura 18b-3), donde se observan valores menores a 16 para todas las presiones de trabajo, ratificando la independencia de esta coordenada con la presión presentada en la Tabla 24, lo que significa, que el color amarillo dado en la fritura a las tajadas de plátano, prevalece sobre los colores verde y rojo. Al analizar los cortes a fuerza térmica constante (Figuras 18c-1 a 18c-3) se observa una dependencia de la fuerza térmica y el tiempo con las coordenadas L^* , b^* y a^* quedando registradas en la Tabla 24, aquí, se ratifica el cambio de las coordenadas de color al aumentar la fuerza térmica con tiempos bajos y al disminuir la fuerza térmica con tiempos altos.

Las altas fuerzas térmicas y altos tiempos no favorecen a la coordenada b^* , a diferencia de los valores intermedios en estas mismas variables que podrían resultar benéficos para bajos contenidos finales de humedad y aceite (Figuras 18c y 18d).

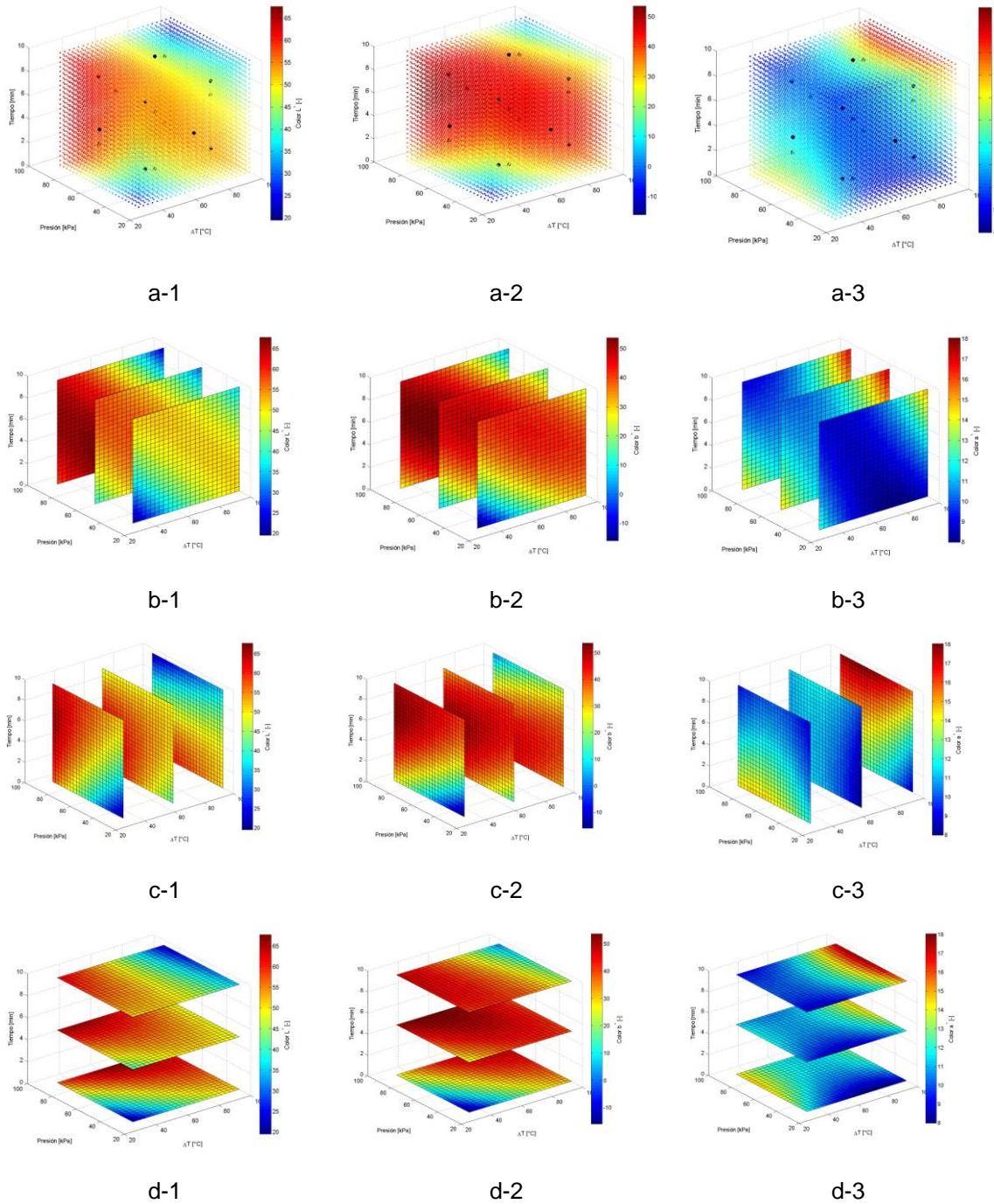


Figura 18. Superficies de respuesta y cortes para las coordenadas de color L^* , b^* y a^* . a) Superficie de respuesta, b) P constante, c) ΔT constante, d) t constante

Las superficies de respuesta para las tres variables de control y la variable textura (fragilidad) o punto de quiebre de las tajadas fritas de plátano, se presentan en la Figura 19. Es difícil definir el valor ideal para el punto de ruptura en las tajadas fritas de plátano, ya que debe de haber un estudio sensorial que confirme tal fin, para contrarestar esto se realizaron pruebas con un analizador de textura a diversos productos comerciales de tajadas fritas de plátano, encontrando una fuerza de ruptura de 29.3 ± 4.5 N, lo que corresponde en la escala de la Figura 19 al color amarillo. Diversos autores (Tabla 9) presentan valores para el punto de ruptura de las tajadas de productos fritos como, manzana, zanahoria, papa, mango, papa dulce y papa azul. En estos estudios los autores concluyen que la fuerza de quiebre no tiene el mismo comportamiento para todos los productos, posiblemente debido a la diferencia entre las composiciones de las materias primas utilizadas.

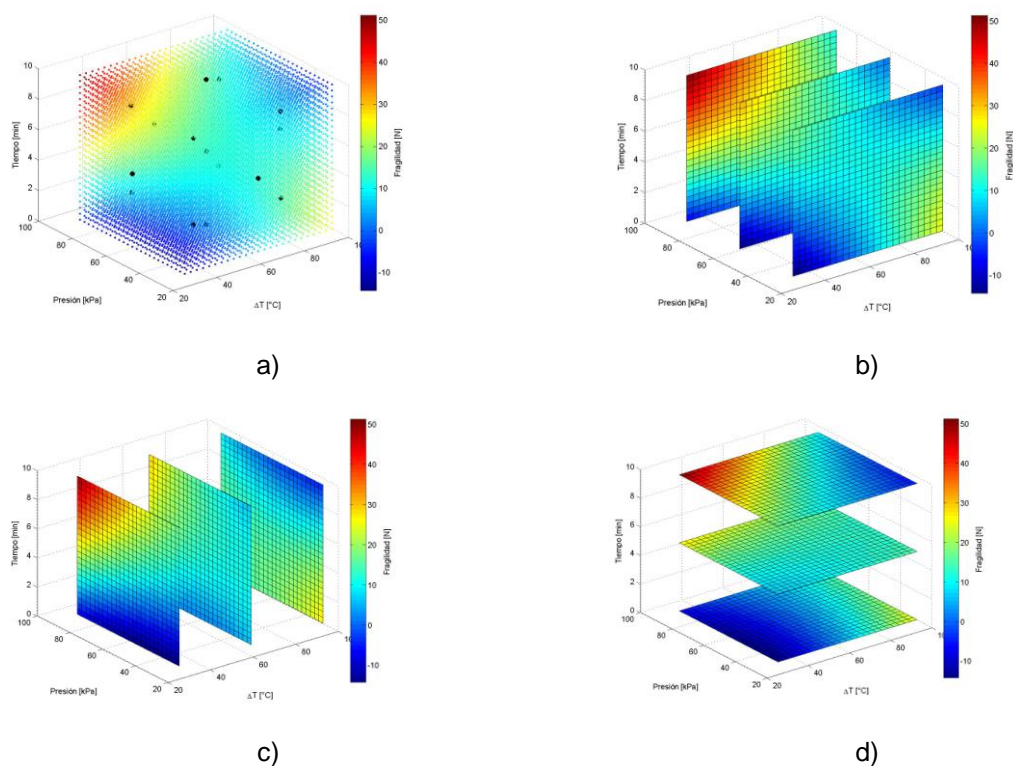


Figura 19. Superficie de respuesta y cortes para la textura (fragilidad). a) Superficie de respuesta, b) P constante, c) ΔT constante, d) t constante

La dependencia de la fuerza térmica y el tiempo, con la fuerza de ruptura se registró en la Tabla 24, además, se puede ver que los valores deseados del punto de ruptura, están

ubicados a presiones mayores a 70 kPa (Figura 19b), tiempos altos (>7 minutos) (Figura 19c) y fuerzas térmicas bajas (< 40 °C) (Figura 19d).

La formación de corteza en las tajadas de plátano no se beneficia con las bajas presiones, lo cual queda evidenciado con los bajos valores de la fuerza de quiebre, que hace que el producto se quiebre fácilmente, debido a que la velocidad de secado es más baja en la superficie, a pesar de que el agua superficial alcanza la temperatura de ebullición en menor tiempo.

4. CONCLUSIONES

- ❖ La variedad Dominico Hartón mostró la mayor homogeneidad estadística en todo el racimo, destacándose por sus bajos contenidos de humedad y con valores aceptables de peso, longitud y diámetro central.
- ❖ Los altos valores de la materia seca en la variedad Dominico Hartón la hace una variedad apta para el procesamiento en aceites calientes, ya que disminuye el tiempo de fritura y el contenido final de aceite en el producto.
- ❖ Con base en los resultados de alto contenido de humedad, la variedad África no se recomienda para procesos de fritura por inmersión.
- ❖ El coeficiente de transferencia de calor no presentó diferencias significativas en las condiciones de proceso, con lo que se puede concluir que el nivel de vacío utilizado no afectó la transferencia de calor, a diferencia, de la difusividad másica que presentó significancia con la fuerza térmica pero no con la presión, afectándose así la transferencia de masa por la temperatura del aceite en la fritura por inmersión de rodajas circulares de plátano.
- ❖ El contenido final de aceite y la velocidad en la salida de vapor de agua aumentaron a medida que lo hizo la fuerza térmica equivalente.
- ❖ El punto de quiebre de las rodajas de plátano fritas no tuvo diferencia estadística para presiones mayores de 60 kPa, a diferencia, de la variable tiempo, la cual fue aumento a medida que lo hizo la fuerza térmica equivalente.
- ❖ Los modelos matemáticos obtenidos en las coordenadas de color L^* y a^* , mostraron leve variabilidad en las condiciones de proceso, lo que demuestra que la utilización de presiones de vacío no afectaron estas coordenadas de color en las rodajas de plátano.
- ❖ El análisis de resultados permitió establecer que las mejores condiciones de proceso, fueron 72.7 kPa para la presión, 57.4 °C para la fuerza térmica equivalente y 6.1 min para el tiempo de proceso. Para estas condiciones la temperatura del aceite fue 140°C.
- ❖ La coordenada de color b^* fue la única variable que se comportó con un máximo en el análisis de superficies de respuesta, con un coeficiente de correlación de a 0.91, además, al igual que la coordenada de color L^* tuvieron interacción en todos los efectos, lo que es muy importante ya que se pueden obtener tajadas de plátano con un color amarillo en los intervalos de las condiciones de proceso seleccionadas.

- ❖ Se recomienda realizar estudios que exploren al híbrido FHIA 21 en procesos de fritura por inmersión debido a los resultados encontrados en la caracterización física, que posicionan este híbrido como un fruto promisorio, además, es importante realizar estudios que evalúen el efecto de la fisiología de la maduración de plátanos variedad Dominico Hartón que establezcan el efecto generado de variables tan importantes como los días de cosecha, el contenido de almidón y azúcares totales en los productos obtenidos en la fritura por inmersión, por último, es necesario evaluar presiones menores a 30 kPa debido a que la bibliografía encontrada en fritura por inmersión al vacío se utilizan presiones alrededor de 5 kPa.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ❖ AGRONET 2010. AGRONET
<http://www.agronet.gov.co/agronetweb1/Estad%C3%ADsticos/ReportesEstad%C3%ADsticos.aspx>
- ❖ A.O.A.C. Official methods of analysis, 16 ed., Washington: Association of official Analytical Chemists. 1995.
- ❖ AGUILERA, J. M. y HURTADO, G. Determination of oil in fried potato products by differential scanning calorimetry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 45, 781-785. 1997.
- ❖ ALVAREZ, H., SALAMANCA, G. Contribución didáctica en el uso de herramientas de diseño experimental en la optimización de procesos mediante superficies de respuesta. *Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos*. CIBIA 16 (2), 350-352. 2007.
- ❖ ARBOLEDA, A. y CHAVEZ, R. Evaluación de un sistema de control y registro de temperatura en el proceso de fritura. Trabajo de grado para Tecnología de Alimentos. Universidad del Valle y Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Colombia. Noviembre de 2006.
- ❖ ARCILA, P. CELIS, G. Maduración de los frutos del híbrido FHIA 21 asociada a la edad de cosecha; en el departamento del Quindío, Colombia. *Memorias XV* 507-511. 2002.
- ❖ ARCILA, P., Aceptabilidad por el consumidor de los plátanos Africa 1 y FHIA 21 en el departamento del Quindío, Colombia. *Memorias XV* 578-811. 2002.
- ❖ BAIK, O. y MITTAL, G. Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying. *Food Research International*. 38, 183–191. 2005.
- ❖ BAUMANN, B. y ESCHER, F. Mass and heat transfer during deep-fat frying of potato slices, rate of drying and oil uptake. *Lebensmittel Wissenschaft and Technologie*. 28, 395-403. 1995.
- ❖ BERTOLINI, R., CAMPAÑONE, A., GARCÍA, A. y ZARITZKY, N. Application of edible coatings in fried foods. 16 (2), 27-32. *Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos CIBIA*. 2007.
- ❖ BOUCHON, P., HOLLINS, P., PEARSON, M., PYLE, D., y TOBIN, M. Oil distribution in fried potatoes monitored by infrared microspectroscopy. *Journal of food science*. 66, 918-923. 2000.
- ❖ BOUCHON P. y PYLE D. Modelling Oil Absorption During Post-Frying Cooling: II: Solution of the Mathematical Model, Model Testing and Simulations. *Food and Bioproducts Processing*. 83, 4, 261-272. 2005.
- ❖ BOURNE, M. *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. 2ª edition. New York. 2002.
- ❖ BRAVO, J., RUALES, J., CLEMENTE, G. y SANJUÁN, N. La fritura al vacío. VI Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos. Pág. 33. Vol 16 (2) 2008.
- ❖ BRAVO, J., RUALES, J., SANJUAN, N. y CLEMENTE, J. Innovaciones en el proceso de fritura. La fritura al vacío. *Alimentación,-Equipos-y-Tecnología*. 25(209), 87-94. 2006.
- ❖ BUDZAKI, S. y SERUGA, B. Determination of convective heat transfer coefficient during frying of potato dough. *Journal of Food Engineering* 66. 307–314. 2005
- ❖ CAYÓN, D.G., GIRALDO, G.A. y ARCILA, M.I. Postcosecha y agroindustria del plátano en el eje cafetero de Colombia. Corpocia – Comité de Cafeteros del Quindío –

Universidad del Quindío – Asociación para la investigación del plátano – COLCIENCIAS. 2000.

- ❖ CENGEL, Y. Transferencia de Calor. McGraw Hill. México. 2004.
- ❖ CHEN, Y. y MOREIRA, R. Modelling of a Batch Deep-Fat Frying Process for Tortilla Chips. Food and Bioproducts Processing. 75(3), 181-190. 1997.
- ❖ COCHRAN, W.G. y COX, G.M. Diseños de experimentos. 2ª ed. México, Trillas. p. 661,1990.
- ❖ COSTA, R.M., OLIVEIRA, F.A.R., DELANEY, O. y GEKAS, V. Analysis of the heat transfer coefficient during potato frying. Journal of Food Engineering. 39, 293-299. 1999.
- ❖ CRANK, J. The Mathematics of diffusion. Oxford at the Clarendon press. 1975.
- ❖ DA SILVA, P., MOREIRA R. Vacuum frying of high-quality fruit and vegetable-based snacks. Food Science and Technology. xx, 1-10. 2008.
- ❖ DANA, D. y SAGUY, I.S. Review: Mechanism of oil uptake during deep-fat frying and the surfactant effect theory and myth. Advances in Colloid and Interface Science. 3, 128-130. 2006.
- ❖ DIAZ, A. La deshidratación por fritura aplicada al plátano. II Seminario internacional de Plátano. Memorias 257-263. 2005.
- ❖ DIAZ, A., TOTTE, M., GIROUX, F., REYNES, M y RAOULT WACK, A.L. Deep-fat frying of plantain (*Musa paradisiaca* L.) I. Characterization of control parameters. Lebensmittel-Wissenschaft and-Technologie. 29, 489-497. 1996.
- ❖ DINCER, I. y YILDIZ, M. Modelling of thermal and moisture diffusions in cylindrically shaped sausages during frying. Journal of Food Engineering. 28, 35-43. 1996.
- ❖ DUEIK, V., ROBERT, P., BOUCHON, P. Vacuum frying reduces oil uptake and improves the quality parameters of carrot crisps. Journal Food Chemistry. 119, 1143-1149. 2010.
- ❖ DUFOUR, D., GIRALDO, A., LOPEZ, X., CASTELLANOS, F., SANCHEZ, T., FERNANDEZ, A. y DIAZ, A. Diversidad del plátano de cocción consumido en Colombia. 16 (1) 168-172. Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos CIBIA. 2007.
- ❖ DURAN, M., PEDRESCHI, F., MOYANO, P. y TRONCOSO, E. Oil partition in pre-treated potato slices during frying and cooling. Journal of food Engineering. 81. 257-265. 2007.
- ❖ ENA 2009. Encuesta Nacional Agropecuaria 2010. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Republica de Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Corporación Colombia Internacional. 2009.
- ❖ FAN, L., ZHANG, M y MUJUMDAR, A. Vacuum Frying of Carrot Chips. Drying Technology. 23, 645–656. 2005.
- ❖ FAN, L., ZHANG, M., XIAO, G., SUN, J. y TAO, Q. The optimization of vacuum frying to dehydrate carrot chips. International Journal of Food Science and Technology. 40, 911–919. 2006.
- ❖ FAOSTAT 2012. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- ❖ FARID, M. y CHEN, X. The analysis of heat and mass transfer during frying of food using moving boundary solution procedure. Heat and Mass Transfer. 34(69-77). 1998.
- ❖ FARINU, A. y BAIK, O. Heat transfer coefficients during deep fat frying of sweet potato: Effects of product size and oil temperature. Food Research International 40. 989–994. 2007.
- ❖ FARKAS, B.E. y HUBBARD, L.J. Analysis of convective heat transfer during immersion frying. Drying Technology. 18(5), 2000.

- ❖ FARKAS, B.E., SINGH, R.P. y RUMSEY, T.R. Modeling heat and mass transfer in immersion frying. I. Model development, *Journal of Food Engineering*. 29: 211-223, 1996a.
- ❖ FARKAS, B.E., SINGH, R.P. y RUMSEY, T.R. Modeling heat and mass transfer in immersion frying. II. Model solution and verification, *Journal of Food Engineering*. 29: 227-248, 1996b.
- ❖ FASINA, O. y SOKHANSANJ, S. Estimation of Moisture Diffusivity Coefficient and Thermal Properties of Alfalfa Pellets. *Journal. agric. Engineering Research* 63 333-344. 1996.
- ❖ FENNEMA, O. R. *Química de alimentos* (3 ed.). New York,: Marcel Dekker Inc. 1996.
- ❖ GAMBLE, M., RICE, P. y SELMAN, J. Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from CV record UK tubers. *International Journal of Food Science and Technology*. 22, 233-241. 1987.
- ❖ GARAYO, J. y MOREIRA, R. Vacuum frying of potato chips. *Journal of Food Engineering*. 55. 181-191. 2002.
- ❖ GILABERT E., *Medida del color*. Edita: Servicio de Publicaciones. Camino de Vera. Valencia - España. 1998.
- ❖ GONZÁLEZ H., GIRALDO L., VILLA P. Segundo Seminario Internacional de plátano. Manizales – Colombia: Editores S.A; 2005. p 96-101.
- ❖ GRANDA, C., MOREIRA, R., y TICHY, S. Reduction of Acrylamide Formation in Potato Chips by Low-temperature Vacuum Frying. *Journal-of-Food-Science*. 69(8): E405-E411. 2004.
- ❖ GRAZYNA, L. y GRAZYNA, G. Structural changes of potato tissue during French fries production. *Food Chemistry* 93 681-687. 2005
- ❖ HERRERA, J. y ARISTIZÁBAL, M. Caracterización de crecimiento y producción de híbridos y cultivariedades de plátano en Colombia. *Infomusa* 12(2):22-24. 2003.
- ❖ HOLLMAN, J.P. *Transferencia de Calor*. McGraw Hill. 2002.
- ❖ HUBBARD, J.L. y FARKAS, B.E. A method for determining the convective heat transfer coefficient during immersion frying. *Journal of Food Process Engineering*. 22, 201-214. 1999.
- ❖ HUBBARD, J.L. y FARKAS, B.E. Influence of oil temperature on convective heat transfer during immersion frying, *Journal of Food Processing Preservation* 24: 143-162, 2000.
- ❖ HUBBARD, J.L. y FARKAS, B.E. Oil temperature effect on the convective heat transfer coefficient during immersion frying, *Annual meeting, Atlanta, G.A*, 1996.
- ❖ IKOKO, J. y KURI, V. Osmotic pre-treatment effect on fat intake reduction and eating quality of deep-fried plantain. *Food Chemistry*. 102. 523-531. 2007.
- ❖ Instituto Nacional de Nutrición. *Tabla de composición de alimentos colombianos*. Bogota. 2005.
- ❖ KROKIDA, M.K., OREOPOULOU, V. y MAROULIS, Z. Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. *Journal of Food Engineering*. 43. 147-154, 2000a.
- ❖ KROKIDA, M.K., OREOPOULOU, V. y MAROULIS, Z. Water loss and oil uptake as a function of frying time. *Journal of Food Engineering*. 44: 39-46. 2000b.
- ❖ LIU-PING, F., MIN-ZHANG W, GONG-NIAN, X., JIN-CAI, S. y QIAN-TAO K. The optimization of vacuum frying to dehydrate carrot chips. *International Journal of Food Science and Technology*. 40, 911-919. 2005a.

- ❖ MARISCAL, M. y BOUCHON, P. Comparison between atmospheric and vacuum frying of apple slices. *Food Chemistry*. 107, 1561-1569. 2008.
- ❖ MATH, R., VELU, V., NAGENDER, A. y RAO, D.G. Effect of frying conditions on moisture, fat, and density of papad. *Journal of Food Engineering*. 43, 429-434. 2004.
- ❖ MELLEMA, M. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. *Trends in Food Science & Technology*. 14, 364-373. 2003.
- ❖ MILLER, K.S, SINGH R.P. y FARKAS B.E. Viscosity and heat transfer coefficient for canola, corn, palm, and soybean oil. *J. Food Process Preservation*. 18, 89-103. 1994.
- ❖ MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Observatorio Agrocadenas Colombia. Documento de trabajo No. 102. La cadena del plátano en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991 - 2005.
- ❖ MORALES, H. Caracterización bromatológica y uso potencial de harinas de plátano en siete épocas de coOPTIMIha. Tesis Universidad del Quindío, Colombia. 1994.
- ❖ MOREIRA, R. Deep-Fat Frying of Foods. *Food Processing Operations Modeling*. 115-146. New York: Marcel Dekker, Inc. 2001.
- ❖ MOREIRA R., SUN X. Y SUN X. Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep-fat frying. *Food Engineering*. 31, 4, 485-498. 1997.
- ❖ MOREIRA, R.G., CASTELL-PEREZ, M.E. y BARRUFET, M.A. Deep-fat frying. Fundamentals and applications, An aspen publication, Gaithersburg, Maryland, 1999.
- ❖ MOREIRA, R.G., PALAU, J.K. y SUN, X. Deep-fat frying of tortilla chips: An Engineering approach. *Food Technology*. 49, 351-366. 1995b.
- ❖ MOREIRA, R.G., PALAU, J.K. y SUN, X. Thermal and physical properties of tortilla chips as a function of frying time. *Journal Food Process Preservation*. 19, 56-74. 1995a.
- ❖ NIELSEN, J. Microbial process kinetics. In: C. R. B. Kristiansen, *Basic Biotechnology*. 163-165. Cambridge: Cambridge University Press. 2006.
- ❖ NGADI, M.O., WANG, Y., ADEDEJI, A.A., RAGHAVAN, G.S.V. Effect of microwave pretreatment on mass transfer during deep fat frying of chicken nugget. *Lebensmittel-Wissenschaft and-Technologie*. – *Food Science and Technology*. 42, 438–440. 2009.
- ❖ PEDRESCHI, F. y MOYANO, P. Effect of pre-drying on texture and oil uptake of potato chips. *Lebensmittel-Wissenschaft and-Technologie*. 38, 599-604. 2005.
- ❖ PEDRESCHI, F., MOYANO, P., SANTIS, N. y PEDRESCHI, R. Physical properties of pre-treated potato chips. *Journal of Food Engineering*. 79, 1474-1482. 2007.
- ❖ PINTHUS, E. y SAGUY, I. The effect of interfacial tension on oil uptake during deep fat frying Abstract from. *International Food Technology Annual Meeting Chicago*. IL. 1993.
- ❖ PINTHUS, E., WEINBERG, P., y SAGUY, I.S. Oil uptake in deep fat frying as affected by porosity. *Journal of food science*. 60, 767-769. 1995.
- ❖ REID, R. C., PRAUSNITZ, J. M. y SHEWOOD, T. K. *The properties of gases and liquids*. McGraw Hill. USA. 1997.
- ❖ RODRIGUEZ, C. Caracterización de proceso de fritura de chips de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) optimización de proceso. Trabajo de grado. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 1998.
- ❖ SAGUY, I. y DANA, D. Integrated approach to deep fat frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects. *Journal of Food Engineering*. 56, 143-152. 2003.
- ❖ SAGUY, I.S. y PINTHUS, E.J. Oil uptake during deep fat frying: factors and mechanism. *Food Technology*. 49; 142-145,152. 1995.
- ❖ SAHIN, S., SASTRY, S. y BAYINDIRLI, L. Heat transfer during frying of potato slices. *Lebensmittel-Wissenschaft and-Technologie*. 32, 1, 19-24. 1999a.

- ❖ SAHIN , S., SASTRY, S. y BAYINDIRLI, L. The determination of convective heat transfer coefficient during frying. *Journal of Food Engineering*. 39, 307-311. 1999b.
- ❖ SARAVACOS, G. y MAROULIS, Z. *Transport properties of foods*. Marcel Dekker, Inc. New York, USA. 2001.
- ❖ SEGNINI, S., DEJMEK, P. y OSTE, R. Reproducible Texture Analysis of Potato Chips. *Journal of food science*. 64, 2, 309-312. 1999.
- ❖ SERUGA, B. y BUDZAKI, S. Determination of thermal conductivity and convective transfer coefficient during deep-fat frying of Krostula dough. *European Food Research and Technology*. 221, (3-4), 351-356. 2005.
- ❖ SHYU, S. y HWANG, L. S. Effects of processing conditions on the quality of vacuum fried apple chips. *Food Research International*. 34, 133–142. 2001.
- ❖ SHYU, S., HAU,-L. y HWANG,-S. Effects of processing conditions on the quality of vacuum-fried carrot chips. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 85(11): 1903-1908. 2005.
- ❖ SINGH, R.P. Heat and mass transfer in foods during deep-fat frying. *Food Technology*. 49 (4), 134-137. 1995.
- ❖ SIPSA. SISTEMA DE INFORMACIÓN DE PRECIOS DEL SECTOR AGROPECUARIO. Boletín mensual. Septiembre 2007.
- ❖ TAN, K. J. y MITTAL, G. S. Physicochemical Properties Changes Of Donuts During Vacuum Frying. *International Journal of Food Properties*. 9, 85–98. 2006.
- ❖ TOTTE, M., DIAZ, A., MAROUZE R., y RAOULT – WACK, A.L. Deep-fat frying of plantain (*Musa paradisiaca* L.) II. Experimental study of solid/liquid phase contacting systems. *Lebensm – Wiss. U. Technol*. 29, 489-497. 1996.
- ❖ TRONCOSO, E., PEDRESCHI, F., ZUÑIGA, R. Comparative study of physical and sensory properties of potato slices during atmospheric and vacuum deep fat frying. 16 (3) 294-296. Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos CIBIA. 2007.
- ❖ TSENG, Y., MOREIRA, R.G. y SUN, X. Total frying-use time effects on soybean oil deterioration and on tortilla chip quality. *Journal Science Technology*, 31, 731-751. 1996.
- ❖ VELEZ, J. y SOSA, M.E. Evaluation of physical properties of dough of donuts during deep-fat frying at different temperatures. *International Journal of Food Properties*. 6 (2) 341-353. 2003.
- ❖ VITRAC, O., DUFOUR, D., TRYSTRAM, G., RAOULT, A. Characterization of heat and mass transfer during deep fat frying and its effect on cassava chip quality. *Journal of Food Engineering* 53. 161-176. 2002.
- ❖ WANG, N. y BRENNAN, J. G. Thermal Conductivity of Potato as a Function of Moisture Content. *Journal of Food Engineering* 17. 153-160. 1992.
- ❖ WANG, Y. Heat and Mass Transfer in Deep Fat Frying of Breaded Chicken Nuggets. Master of Science. Department of Bioresource Engineering. McGill University. Quebec H9X 3V9. Canada. 5-72. 2005.
- ❖ YILDIZ, A., PALAZOGLU, K. y ERDOGDU, F. Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering*. 79 (1). 11-17. 2006.

6. ANEXOS

6.1 ANEXO 1.

INFORMACIÓN GENERAL DE LAS VARIEDADES ESTUDIADAS

VARIABLES	FHIA 20 Primer racimo	FHIA 20 Segundo racimo	FHIA 20 Tercer racimo	DMINICO HARTÓN Primer racimo	DMINICO HARTÓN Segundo racimo	DMINICO HARTÓN Tercer racimo	FHIA 21 Primer racim	FHIA 21 Segundo racimo	AFRICA Primer racimo	AFRICA Segundo racimo	AFRICA Tercer racimo
Fecha de cosecha	02/02/ 2007	31/03/ 2008	13/04/ 2008	22/02/ 2007	16/10/ 2007	17/03/ 2007	13/11/ 2007	13/04/ 2008	22/02/ 2007	17/03/ 2007	31/03/ 2008
Peso del racimo (kg)	23	26,8	28,3	19	20,7	15,8	16,5	23	13	10,8	17,6
Número de manos	7	7	6	9	7	7	3	6	5	6	5
Número de dedos	99	110	79	67	62	56	44	76	19	21	25
Numero de dedos fila A ¹	59	60	47	44	44	39	25	46	16	16	25
Dedos en la Fila A (%)	60	55	59	66	71	70	57	61	84	76	100
Número de dedos fila B ²	40	50	32	23	18	17	19	30	3	5	0
Dedos en la Fila B (%)	40	45	41	34	29	30	43	39	16	24	0

¹ Corresponde a la fila exterior del racimo, ella está en contacto directo con los rayos de sol.

² Corresponde a la fila interior del racimo, ella no está en contacto directo con los rayos de sol.

6.2. ANEXO 2.

CONDICIONES DE COSECHA PARA LAS VARIEDADES DE PLÁTANO, ÁFRICA, DOMINICO HARTÓN, FHIA 20 Y FHIA 21.

Comparación de variables de crecimiento entre materiales de plátano.

Variables	FHIA 20	FHIA 21	AFRICA	DOMINICO HARTÓN
Altura de la planta (m)	3.7	3.3	3.4	3.4
Diámetro del pseudotallo (cm)	23	19	18	17
Días de floración	300	355	274	303
Días de cosecha	423	462	367	411
Días entre floración y cosecha	123	107	93	108
Hojas emitidas	35	36	32	37
Hojas funcionales a floración	12	9	8	9
Hojas funcionales a cosecha.	3	4	3	1

Fuente Herrera y Aristizabal, 2003.

Comparación de componentes de rendimiento entre materiales de plátano.

Variables	FHIA 20	FHIA 21	AFRICA	DOMINICO HARTÓN
Nº dedos 1ª mano	19	16	7	11
Peso 1ª mano (g)	8.9	3.4	4.3	5
Nº dedos 2ª mano	16	13	7	10
Peso 2ª mano	7.2	2.8	3.7	4.1
Dedos totales	103	74	25	45
Peso dedo central 2ª mano (g)	502	235	513	446
Diámetro dedo central 2ª mano (cm)	4.8	3.4	5.5	5
Longitud dedo central 2ª mano (cm)	25.8	17.9	26.4	25.9
Peso total del racimo (g)	40	17	14.8	19.2

Fuente Herrera y Aristizabal, 2003.

6.3. ANEXO 3.

PROTOCOLOS PARA LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y REOLÓGICA DE LAS VARIEDADES DE PLÁTANO

CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Principio

Fue necesario estandarizar un protocolo de análisis que permitió demostrar y evaluar la diversidad de forma, variabilidad entre las manos (gajas) de un mismo racimo, entre los dedos (plátanos), de una misma mano. Con fines a conocer las variedades desde un punto de vista de poscosecha y a mejorar ensayos posteriores en la tecnología de alimentos.

Materiales y Equipos

Cuchillos	Cámara Fotográfica	Cámara ambiental
Marcadores	Cinta de enmascarar	Bolsas plásticas
Cinta métrica (± 0.001 m.)	Lápices	Recipientes de plástico
Balanza de precisión (± 0.001 g.)	Recipiente de cristal 8.5 L	Calibrador o pie de rey

Método

El análisis físico se realiza en dos momentos, uno con cáscara y el otro sin ella. A cada uno de estos se le realizarán las siguientes mediciones: peso, longitud, perímetro central y densidad aparente. Después de pelado el plátano, se le debe pesar la cáscara, la cual no debe contener partes de pulpa. La densidad aparente se obtiene mediante la metodología del volumen de agua desplazado (Dufour *et al.*, 2007) finalmente la materia seca se logra cortando el plátano pelado en rodajas finas que inmediatamente se secan en un horno de convección forzada bajo condiciones estandarizadas de 105 °C hasta peso constante (A.O.A.C. 1995).

1. Recepción de la variedad de plátano en verde (Brix < 4 °), con la madurez fisiológica cumplida.
2. Tomar fotografías del racimo al momento de la recepción.
3. Almacenar el racimo bajo condiciones especiales de temperatura y humedad relativa, debido a que si la temperatura es inferior a 12 °C ocasiona quemaduras por frío y si es superior a 18 °C acelera la maduración, la humedad relativa debe estar entre 80 y 90 %.
4. No almacenar varios racimos debido a que algunos de ellos tienen un tiempo de vida en verde muy corto y podrían aumentar su estado de maduración. Evitar golpear el racimo en el transporte, ya que esto acelera el proceso de maduración y cambia el valor de las propiedades físicas y fisicoquímicas.

5. Escribir los datos en el formato respectivo que cumpla con las variables a medir. Registrar el momento de iniciar el análisis, el nombre de la variedad, el número del ensayo, el origen del racimo, además, las fechas de cosecha, de llegada al lugar de trabajo y de inicio de análisis.
6. Pesar y tomar una fotografía del racimo completo, al momento de análisis.
7. Desmanar, esta operación consiste en retirar las manos del vástago en forma descendente de acuerdo a la ubicación en la planta, conservando el orden de desgaje, teniendo cuidado en que no haya desprendimiento de ningún dedo en la mano, si esto sucede, se debe ubicar en la posición de origen para que la rotulación sea acorde al orden respectivo.
8. Debido a que la mano tiene dos filas, se inicia la rotulación con la fila inferior de acuerdo a la ubicación de la mano sobre el raquis o vástago. Al realizar la rotulación de los dedos se enumera de izquierda a derecha sobre la cáscara del plátano o dedo. La primera categoría corresponde a la mano respectiva, la segunda identifica la fila, agregando la letra A para la fila superior y la letra B para la inferior, la tercera categoría representa al plátano correspondiente que se distingue con un número. Para enumerar la fila B se debe conservar el orden la fila A.
9. Tomar dos fotografías de cada mano, de tal forma que se puedan observar cada una de sus filas, y rotulando sobre la superficie donde se ubica la mano con el nombre de la variedad, el número de la mano y la fila respectiva. Registrar en el formato, las fechas de toma de las fotografías, del racimo, de las manos y los dedos, los pesos y el número de dedos de cada una de las manos.
10. Realizar las observaciones sobre el estado del racimo, como posibles daños, color, dedos malos, entre otras, y anotarlas en la hoja de datos, anotándolas en el formato.
11. Quitarle los dedos a la mano y colocarlos sobre una mesa conservando el orden en que fueron enumerados, y el orden descendente en las manos.
12. Seleccionar un plátano de cada mano para la fotografía individual, si no se va a tomar las fotos inmediatamente almacenar como se indica en el ítem tres.
13. Seleccionar de las siguientes manos para análisis de plátanos individuales, la primera, la intermedia y la última, escogiendo una muestra estadísticamente representativa en cada una de ellas para el análisis físico, y realizar las mediciones respectivas anotándolas en el formato.
14. Cuando el plátano presenta aristas o bordes muy pronunciados, se debe utilizar un calibrador que mida el espesor del dedo en el centro de cada muestra, tomando cinco medidas que se obtienen rotando el calibrador sobre el mismo eje, estos datos se almacenan en el formato.
15. La densidad del racimo de plátano se realizó en dos formas, la primera corresponde a un análisis individual, que consistió en seleccionar tres plátanos de tres manos del racimo (mano proximal, mano intermedia y mano distal con referencia a la posición con el pseudotallo), a continuación se introducen, cada uno y por una sola vez, en un recipiente completamente lleno de agua, obteniéndose el agua desplazada, la cual es pesada y registrada en la hoja de datos, luego se realiza el pelado correspondiente realizando el mismo procedimiento descrito anteriormente. La segunda forma se refiere a un análisis global, la cual consiste en tomar las manos que no se analizaron individualmente, para cada mano se conforman tres grupos con los plátanos que la componen, luego cada grupo y por una sola vez, se introduce en un recipiente, que esta totalmente lleno con agua, obteniéndose el agua desplazada, la cual es pesada y registrada en la hoja de datos, luego se realiza el pelado correspondiente de cada grupo y se repite el procedimiento inmediatamente anterior. En ambas formas de obtención del agua desplazada es necesario que los plátanos queden totalmente sumergidos.

16. La materia seca se mide eligiendo muestras de cada dedo y de cada mano luego de ser rebanados en una procesadora de alimentos.

17. Pesar los recipientes junto con la pulpa picada que corresponden a cada una las manos para obtener su peso picado antes de retirales su humedad, almacenar los datos.

18. Tomar muestras repetidas para hacer análisis de materia seca. Se recomienda que la medición de la materia seca se haga recién se hallan picado los plátanos para así, evitar pérdidas de humedad y por ende variación en el peso.

19. Introducir las muestras de materia seca en el horno de ventilación forzada durante 3 horas a 60 grados centígrados.

Cálculos

Diámetro Central.: Es posible realizar esta medición de dos formas según la pronunciación de las aristas o bordes o filos del plátano, la primera forma, aplica a plátanos con aristas muy definidas, se mide tres veces el diámetro central de cada plátano con la ayuda de un calibrador y luego se puede obtener el promedio aritmético respectivo. El segundo método se utiliza para plátanos que tienen las aristas pocos pronunciadas, se mide el perímetro central del plátano y se calcula el diámetro central con la siguiente ecuación:

$$P = \pi D$$

de donde:

P= Perímetro

D = Diámetro central

Densidad Aparente: Esta se calcula mediante la relación de masas plátano antes de sumergirlo en el agua y la masa de agua desplazada, la formula viene dada de la siguiente forma

$$\rho_P = \frac{m_P}{m_{ad}} * \rho_{agua(25^{\circ}C)}$$

Donde:

ρ_p = densidad del plátano

m_p = masa del plátano (con cáscara o sin cáscara)

m_{ad} = masa del agua desplazada por el plátano (con cáscara o sin cáscara).

ρ_{Agua} = densidad del agua 25 °C (1g/cc)

Materia Seca: Los cálculos de la materia seca del plátano crudo o pelado se realizan teniendo en cuenta la relación de los pesos de las cajas petri utilizadas, la ecuación respectiva es:

$$\% Ms = \frac{\text{Peso de muestra seca}}{\text{Peso de muestra húmeda}} \times 100$$

Porcentaje de cáscara.

Corresponde a la relación entre el peso de la cáscara y el peso total (cáscara y pulpa).

$$Cáscara(\%) = \left(\frac{Pesocáscara}{Pesocáscara + Pesopulpa} \right) * 100$$

ELABORACIÓN DE HARINAS Y EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN

Principio

La harina de plátano representa en la industria, una fuente de alimentación importante debido a su disponibilidad en el campo y contenido nutricional. El almidón por otra parte proporciona información válida para la transformación industrial de un determinado producto elaborado a partir del plátano. Con el objeto de que tanto las harinas como almidones se les conozcan sus características químicas y reológicas.

Materiales Y Equipo.

Cámara fotográfica	Refrigerador	Marcadores
Cinta de enmascarar	Bolsas	Lápices
Recipientes de plástico	Cajas petri	Balanza de precisión
Horno con aire forzado	Termómetros	Filtros con malla de 100µm
Procesadora de alimentos	Licuada industrial	Molino

Método. Obtención de harinas de plátano

1. Rebanar los plátanos que se han analizado individualmente en una procesadora de alimentos y se esparcir la pulpa picada de cada uno de ellos en un recipiente de plástico.
2. Las manos a las que se les realizó la medida de la densidad (que no se les hizo densidad individual, por ende se encuentran mezcladas) se rebanan por mano en la procesadora de alimentos, se colocan en un recipiente (de mayor tamaño que los del individual).
3. Pesar los recipientes junto con la pulpa picada que corresponden a cada una las manos para obtener su peso picado antes de retirales su humedad.
4. Distribuir tanto las muestras individuales como las de las manos organizadas y debidamente rotuladas con cinta de enmascarar en bandejas de aluminio. Teniendo en cuenta que no todo el plátano picado que corresponde a las manos, se coloca en la bandeja. Pues se necesitan para hacer almidón.
5. Rebanar los plátanos que no son analizados individualmente, en la cortadora y junto con los plátanos rebanados de las manos se hace una mezcla. Una parte de esa mezcla se coloca en una bandeja y se introduce en el horno con las demás muestras a una temperatura de 40° centígrados durante 24 horas.

6 Sacar las muestras del el horno con ventilación forzada después de las 24 horas. Embolsarlas, rotularlas y pesarlas (peso seco).

7 Con el molino (martillos, discos o cuchillas) se hace harina de cada una de las muestras, tanto individuales como por manos.

8. Las muestras son almacenadas en el refrigerador a una temperatura de 4 grados centígrados.

9. A las muestras que se encuentran almacenadas en el refrigerador se les realiza análisis de viscosidad en los RVA.

Método. Obtención de Almidón de plátano

1. Colocar la mezcla de los plátanos picados en un recipiente de plástico y posteriormente pesarlos. La mezcla se vierte en una licuadora industrial junto con agua destilada durante un (1) minuto. Esto con el fin de que las estructuras celulares se rompan, y permitan que el almidón se pueda extraer. Como producto se obtiene la lechada.

2. Verter la lechada en un filtro cuya malla (tamiz) es de 100 μ m. Se deja que el agua pase a través de la malla junto con el almidón que lleva consigo.

3. Lavar varias veces el contenido del colador con agua destilada. Una vez terminado; la fibra que queda se desecha.

4 El almidón que aun contiene algo de fibra se deja decantar bien, se elimina el agua junto con la fibra y el material sólido (almidón) se pesa. Se introducen en un beacker para ser mezclados con agua destilada.

5. La mezcla de agua, almidón y algo de fibra se vierten en tubos para centrifuga a un mismo nivel. Los tubos se introducen dentro de la centrífuga a 10000 rev/min durante 10 minutos a temperatura ambiente de 24 grados centígrados.

6. Una vez termina el ciclo de centrifugado se limpia el almidón de nuevo con una espátula metálica y se revuelve con agua para repetir el proceso.

7. El almidón que se obtiene se introducen dentro de cajas de petri, se rotulan con el código que le corresponde a la variedad y se introducen dentro del horno a una temperatura de 40° centígrados durante 24 horas, con el fin de extraerles el agua.

8 El almidón seco se empaca y se almacena en el refrigerador a una temperatura de 4° centígrados.

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS HARINAS DE PLÁTANO

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE MATERIA SECA.

Principio

Un parámetro de calidad tanto para plátanos crudos como productos procesados es el contenido de humedad. El método para determinar el porcentaje de la materia seca de la harina se hace por secado en horno bajo condiciones estandarizadas de 105 °C a peso constante.

Materiales y equipos

Balanza analítica	Cajas de petri o crisoles de Aluminio
Horno con ventilación forzada	Desecadores.
Pinzas metálicas de laboratorio	

Método.

1. Enumerar las cajas con su respectiva identificación.
2. Secar las cajas petri vacías por media hora a 100 °C.
3. Dejar enfriar las cajas en un desecador antes de tomar su peso, en balanza analítica (± 0.001 g.). No manipular las cajas con la mano utilizar siempre una pinza de laboratorio.
4. Agregar una cantidad de muestra a cada caja, teniendo cuidado que quede una sola capa de muestra, registrar su peso.
5. Secar las muestras en horno a 105 °C hasta peso constante.
6. Retirar las cajas petri del horno, dejar enfriar las cajas petri aplicando igual procedimiento que el paso 3.
7. Pesar las cajas con la muestra seca, tomar el valor, no manipular las cajas con la mano utilizar siempre una pinza de laboratorio.
8. Calcular el porcentaje de materia seca.

Cálculo.

$$\text{MateriaSeca(\%)} = \left(\frac{\text{Pesomuestra seca}}{\text{Pesomuestrahumeda}} \right) * 100$$

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AZÚCARES

Principio.

Este método permite la determinación de los azúcares totales y reductores (glucosa, fructosa y sacarosa) en un extracto etanólico acuoso, basado en la capacidad que posee el grupo carbonilo (radicales aldehídos o cetónicos) potencialmente libre de reducir iones metálicos, preferiblemente cobre y plata en soluciones alcalinas.

Materiales, equipos y reactivos

Balanza de precisión con 4 cifras decimales	Calentador múltiple de extracción
Dedales de extracción o papel filtro Whatman # 1.	Extractores Soxhlet de 250 mL

Balones de fondo plano de 250 mL	Condensadores con esmerilados 45/50
Embudos de caña larga	Balones volumétricos de 200 mL
Tubos cónicos graduados de 50 mL	Baño María

Espectrofotómetro

Reactivos

Alcohol etílico al 85% (grado reactivo)	Solución saturada de carbonato de sodio
Ácido clorhídrico 0.1 N.	Reactivo de cobre de baja alcalinidad
Fenolftaleína al 5%	Reactivo de arsenomolibdato

Solución estándar de glucosa (1.2 mg/mL)

Preparar soluciones estándares de 1.2 a 4.8% de glucosa así:

En cuatro tubos de ensayo colocar 1mL; 2mL; 3mL y 4mL de la solución stock y completar el volumen hasta 10mL con agua desionizada.

Método

Extracción

1. Pesar 2.0 g de muestra de harina seca en un dedal de extracción y tapar con una mota de algodón.
2. Poner el dedal en un extractor Soxhlet y dejar que suceda la reacción durante 5,0 horas con 150 mL de etanol al 85%.
3. Remover el dedal del extractor, teniendo cuidado de no perder mucho líquido
4. Extraer el etanol a esta solución hasta que quede completamente acuosa.
5. Destilar el volumen que queda con el extractor y reciclar esta primera extracción.
6. Añadir 80 mL de agua destilada al balón y volver a destilar el etanol. Continuar destilando hasta que haya extraído totalmente el etanol. Llevar esta solución a un volumen de 200 mL.

Marcha química para la determinación de Azúcares Totales y Reductores

1. Pipetear alícuotas de 0.5 mL de la muestra en tubos con tapa graduados a 50 mL.

Determinación de Azúcares Totales

2. Adicionar 2 mL de agua destilada a todos los tubos
- 3 Pipetear 1 mL de ácido clorhídrico 0.1 M en los tubos.
4. Colocar los tubos en un baño de agua hirviendo durante 7 minutos.
5. Sacar y enfriar los tubos en agua fría.

- 6 Añadir 1 gota de fenoltaleína con agitación moderada.
- 7 Agregar unas gotas de solución concentrada de carbonato de sodio hasta que la coloración rojiza persista.
8. Añadir a todos los tubos 2 mL de reactivo de cobre, incluyendo un blanco, agitar y tapar.
9. Colocar en un baño de agua hirviendo fuertemente durante 12 minutos.
- 10 Dejar que se enfríen, si es posible en un chorro de agua fría.
- 11 Añadir 1 mL del reactivo de arsenomolibdato.
- 12 Mezclar bien y diluir a 50 mL con agua doblemente desionizada, agitar.
13. Medir la absorbancia a una λ de 520 nm contra un blanco.

Determinación de Azúcares Reductores

1. Pipetear alícuotas de 0.5 mL de la muestra en tubos con tapa graduados a 50 mL.
2. Adicionar 3 mL de agua destilada a todos los tubos
3. Ir a ítems # 8 – 9 – 10 – 11 – 12 – 13.

Preparar un blanco con 0.5 mL de agua doblemente desionizada., y realizarle igual procedimiento que el de los azúcares reductores, desde el punto 2.

Cálculo.

Con los datos obtenidos con la solución estándar de glucosa, realizar una gráfica % de glucosa en el eje Y vs Absorbancia en el eje X, el coeficiente de determinación debe ser superior a 0.9800, para confiar en la ecuación de la línea recta obtenida, sino, debe repetirse el procedimiento.

Para obtener el contenido de azúcares totales y reductores, se utilizan los valores de absorbancias obtenidos y con la ecuación de la línea recta respectiva, se calcula la cantidad de glucosa (%).

DETERMINACIÓN ENZIMÁTICA DEL CONTENIDO DE ALMIDÓN.

Principio.

Este método consiste en someter la muestra de material insoluble en alcohol a una hidrólisis por vía enzimática. Los valores que se obtienen de la lectura de la curva estándar serán los puntos de referencia para obtener el contenido de glucosa. Para convertir estos a valores de contenido de almidón se debe multiplicar por 0.9, debido a que el valor para el almidón es nueve décimas (0.9) del valor correspondiente al de la glucosa.

Materiales, equipos y reactivos.

Erlenmeyers de 125 mL

Gradilla para erlenmeyers

Embudos de caña larga

Pipetas de 0.75 mL, 0.2 mL y 0.05 mL

Repipetas de 2 mL	Balones volumétricos de 100 mL
Baño de agua con temperatura graduable	Balanza de precisión con cuatro cifras decimales
Espectrofotómetro	

Reactivos

Solución Tampón acetato 2M pH 4.8	Solución Tampón Trifosfato
α -amilasa (thermamyl NOVO)	Solución de Amiloglucosidasa al 0.2%
Solución de glucosa Oxidasa – Peroxidasa – ABTS	
Solución estándar de glucosa (1.2 mg / mL)	

Preparar una solución stock de glucosa de 1.2 mg/mL de igual forma que para la determinación de azúcares. De la solución stock preparar soluciones estándar de 28.8%, 57.6%, 86.4% y 97.92% de la siguiente manera: En cuatro tubos de ensayo colocar 0.1, 0.2, 0.3 y 0.34 mL de la solución stock y completar el volumen hasta 10 mL con agua destilada.

Método.

1. Pesar 0.25 g del material insoluble en alcohol y disolver en 50 mL de agua doblemente deionizada con agitación.
2. Agregar 0.1 mL de α -amilasa (thermamyl NOVO) en erlenmeyers de 125 mL, incubar la solución a 90 °C durante una hora.
3. Dejar enfriar los erlenmeyer y pasar a través de papel filtro Whatman #1 en balones de 100 mL y llevar a volumen con agua destilada.
4. Dilución en 50.
5. Tomar 0.75 mL de la dilución anterior y agregar 0.2 mL de solución tampón acetato 2M pH 4.8 y 0.05 mL de la solución amiloglucosidasa.
6. Incubar la solución a 60 °C durante 2 horas.
7. Agregar 2 mL de agua doblemente deionizada después de que los tubos estén fríos y 2 mL de la solución glucosa oxidasa-peroxidasa-ABTS.
8. Agitar y dejar que la reacción suceda bajo oscuridad durante 30 minutos.
9. Medir la absorbancia a una λ de 560 nm contra un blanco.
10. Preparar Blanco: 3 mL de agua doblemente deionizada y 2 mL de solución glucosa oxidasa - peroxidasa - ABTS, 30 minutos bajo oscuridad.
11. Preparar Curva estándar: Tomar 1 mL de cada estándar y agregar 2 mL de agua doblemente deionizada más 2 mL de solución glucosa oxidasa peroxidasa- ABTS, de igual forma que las

muestras mantener los estándares bajo oscuridad durante 30 minutos y medir la absorbancia a una λ de 560 nm.

Cálculos.

Con los datos obtenidos con la curva estándar, realizar una gráfica glucosa (microgramos) en el eje Y vs Absorbancia en el eje X, el coeficiente de determinación debe ser superior a 0.9800, para confiar en la ecuación de la línea recta obtenida, sino, debe repetirse el procedimiento.

Para obtener el contenido de almidones se utilizan los valores de absorbancias y la ecuación de la línea recta respectiva, se calcula la cantidad de almidón en porcentaje.

6.4. ANEXO 4.

TAMAÑOS DE MUESTRA

Para la determinación del número de repeticiones de las pruebas de análisis de muestra se utilizó el método de Cochran y Cox, el cual señala que la variancia de la diferencia entre las medias de dos tratamientos ofrece un procedimiento sencillo para comparar la precisión relativa de dos experimentos. El número de repeticiones requerido para estimar descubrir una diferencia verdadera entre medias se estima a partir de la fórmula:

$$r \geq 2 \left(\frac{\sigma}{\delta} \right)^2 (t_{\alpha})^2$$

Donde:

r: Numero de repeticiones

σ : Desviación estándar

δ : Diferencia verdadera que se desea detectar

α : Valor significativo de t. tomado de tablas t de student

Debido a que es difícil escoger el valor de δ que se ha de sustituir en la fórmula, es más práctico despejarla:

$$\delta \geq \sqrt{\frac{2}{r}} \sigma t_{\alpha}$$

Para el uso de este método se realizaron unas pruebas piloto con más de 30 datos; a partir de ahí se calcula la varianza a cada una de las variables de los factores medidos, pero para determinar el tamaño de muestra se emplean los datos con la varianza mas grande, la desviación estándar y la media respectivamente.

CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Número de repeticiones para la caracterización física por cada variedad.

R	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALORES DE T (0.05)	Δ (0,05)
2	52,51	12,71	667,44
3	52,51	4,30	184,37
4	52,51	3,18	118,08
5	52,51	2,78	92,33

El número de repeticiones en la variable caracterización física es de tres muestras con un nivel de confianza del 95%.

CONTENIDO DE HUMEDAD

Número de repeticiones para la determinación del contenido de humedad.

R	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALORES DE T (0.05)	Δ (0,05)
2	1,82	12,71	23,15
3	1,82	4,30	6,39
4	1,82	3,18	4,10
5	1,82	2,78	3,20

El número de repeticiones en la variable contenido de humedad es de dos muestras con un nivel de confianza del 95%.

CONTENIDO DE ACEITE

Número de repeticiones para la determinación del contenido de aceite.

R	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALORES DE T (0.05)	Δ (0,05)
2	5,57	12,71	70,74
3	5,57	4,30	19,54
4	5,57	3,18	12,52
5	5,57	2,78	9,79

El número de repeticiones en la variable contenido de aceite es de tres muestras con un nivel de confianza del 95%.

TEXTURA: FRAGILIDAD.

Número de repeticiones para la determinación de la dureza.

R	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	VALORES DE T (0.05)	Δ (0,05)
2	0,37	12,71	4,73
3	0,37	4,30	1,31
4	0,37	3,18	0,84
5	0,37	3,18	0,75

El número de repeticiones en la variable dureza es de cuatro muestras con un nivel de confianza del 95%.

6.5. ANEXO 5.

VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL PROTOCOLO DE TEXTURA

Sonda 1 - Velocidad de 30 mm/s					
	N	Media	Desviación	Coeficiente de Variación (%)	Varianza
Tiempo(s)	21	4,1	2,0E-02	0,5	4,1E-04
Desplazamiento,(mm)	21	2,1	1,0E-02	0,5	1,0E-04
Carga(N)	21	1,1	3,7E-01	32,6	1,4E-01
Sonda 1 - Velocidad 60 mm/s					
	N	Media	Desviación	Coeficiente de Variación (%)	Varianza
Tiempo(s)	21	2,1	2,2E-02	1,1	5,0E-04
Desplazamiento,(mm)	21	2,1	1,5E-02	0,7	2,4E-04
Carga(N)	21	1,0	2,1E-01	19,5	9,5E-02
Sonda 2 - Velocidad de 30 mm/s					
	N	Media	Desviación	Coeficiente de Variación (%)	Varianza
Tiempo(s)	21	4,0	3,3E-01	8,2	1,1E-01
Desplazamiento,(mm)	21	2,0	1,7E-01	8,1	2,7E-02
Carga(N)	21	1,4	1,5E+00	105,1	2,1E+00
Sonda 2 - Velocidad 60 mm/s					
	N	Media	Desviación	Coeficiente de Variación (%)	Varianza
Tiempo(s)	21	2,10	1,7E-02	0,80	2,8E-04
Desplazamiento,(mm)	21	2,13	1,3E-02	0,62	1,8E-04
Carga(N)	21	1,23	4,8E-01	38,88	2,3E-01

6.6. ANEXO 6.

FOTOGRAFÍAS DE LOS RACIMOS DE LAS VARIEDADES DE PLÁTANO



Africa
(*Musa AAB*)



Dominico Hartón
(*Musa AAB*)



FHIA 20
(*Musa AAAB*)



FHIA 21
(*Musa AAAB*)

6.7. ANEXO 7

FOTOGRAFÍAS DE LAS MANOS, DEDOS Y CORTE TRANSVERSAL LAS VARIEDADES DE PLÁTANO ESTUDIADAS



ÁFRICA



DOMINICO HARTÓN



FHIA 20



FHIA 21

a) Mano número dos.



ÁFRICA



DOMINICO HARTÓN



FHIA 20

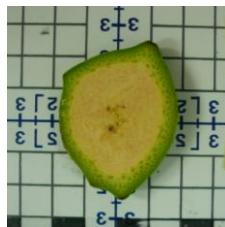


FHIA 21

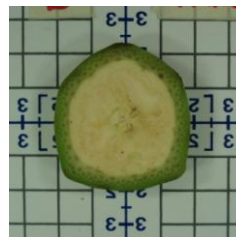
b) Dedo central mano número dos.



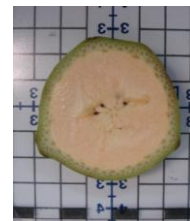
ÁFRICA



DOMINICO
HARTÓN



FHIA 20



FHIA 21

c) Corte transversal de dedo central mano número dos.

6.8. ANEXO 8

ANALISIS DE VARIANZA PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR.

h [W/(m ² °C)]		Presión (kPa)		
		30	60	90
ΔT (°C)	53°C	359,3 ± 71.0	325,4 ± 55.9	483,4 ± 78.5
	73°C	289,4 ± 32.8	276,5 ± 40.5	400,3 ± 108

ANOVA del grupo de h calculados					
Hipótesis nula: Todos los valores de h pertenecen a poblaciones con la misma media					
Hipótesis alternativa: Al menos un grupo no tiene la misma media					
TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F - estadístico</i>	<i>p-Valor</i>
Falta de ajuste	311420,1	5,0	62284,0	4,0	0,0037
Réplicas	771802,7	50,0	15436,1		
Total	1083222,8	55,0			
Resultado:	Hipótesis nula rechazada				

Definición de grupos		
Grupos	P	ΔT
1	30 kPa	53°C
2	30 kPa	73°C
3	60 kPa	53°C
4	60 kPa	73°C
5	90 kPa	53°C
6	90 kPa	73°C

Tabla de comparación entre grupos.

GRUPO i	GRUPO j	DIFERENCIA DE MEDIAS	INTERVALO DE CONFIANZA		¿SON DIFERENTES?
1	2	69,9	-126,9	266,7	NO
1	3	33,9	-162,9	230,6	NO
1	4	82,8	-114,0	279,5	NO
1	5	-124,2	-294,6	46,3	NO
1	6	-41,0	-211,5	129,4	NO
2	3	-36,0	-232,8	160,8	NO
2	4	12,9	-183,9	209,7	NO
2	5	-194,0	-364,5	-23,6	SI
2	6	-110,9	-281,3	59,5	NO
3	4	48,9	-147,9	245,7	NO
3	5	-158,0	-328,4	12,4	NO
3	6	-74,9	-245,3	95,5	NO
4	5	-206,9	-377,3	-36,5	SI
4	6	-123,8	-294,2	46,6	NO
5	6	83,1	-56,0	222,3	NO

6.9. ANEXO 9

VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL MODELAMIENTO DE TRANSFERENCIA DE AGUA.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MODELO PARA $\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$.

Prueba de hipótesis sobre la significancia del modelo frente a un valor constante.
Hipótesis Nula: $\beta = 0$. Hipótesis Alternativa: $\beta \neq 0$ para al menos $j = 1, 2, \dots$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C} - P = 30 \text{ kPa}$					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F - estadístico</i>	<i>p-Valor</i>
Falta de ajuste	6263943,8	1	6263943,77	790,9605	1,78E-31
Réplicas	380131,9	48	7919,41		
Total	6644075,7	49			
Resultado:	Hipótesis nula rechazada				
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C} - P = 60 \text{ kPa}$					
Falta de ajuste	6661842,75	1	6661842,75	901,0493	9,22E-33
Réplicas	354884,51	48	7393,43		
Total	7016727,26	49			
Resultado:	Hipótesis nula rechazada				
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C} - P = 90 \text{ kPa}$					
Falta de ajuste	5967161,51	1	5967161,51	560,9340	3,94-28
Réplicas	510619,33	48	10637,90		
Total	6477780,84	49			
Resultado:	Hipótesis nula rechazada				

Evaluación de los parámetros del modelo.

Prueba de hipótesis sobre la significancia en cada parámetro.

Hipótesis nula: $\beta_j = 0$.

Hipótesis Alternativa: $\beta_j \neq 0$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA						
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$ y $P = 30 \text{ kPa}$						
Parámetro	Valor estimado	Error estándar	Estadístico t	P - valor	Intervalo de confianza	
Fo	3,23	0,30	10,72	0,00	2,62	3,84
Bi	849434,051	3,97E+10	2,14E-05	0,50	-8E+10	7,98E+10
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$ y $P = 60 \text{ kPa}$						
Fo	2,7794	0,2737	10,1562	7,61E-14	2,2292	3,3296
Bi	800467,7	1,9E+10	4,2E-05	0,50	-3,9E+10	3,9E+10
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$ y $P = 90 \text{ kPa}$						
Fo	2,46	0,26	9,50	0,00	1,94	2,98
Bi	771362,39	3,42E+10	2,26E-05	0,5000	-	6,88E+10

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MODELO PARA $\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$

Prueba de hipótesis sobre la significancia del modelo frente a un valor constante.

Hipótesis Nula: $\beta = 0$.

Hipótesis Alternativa: $\beta \neq 0$ para al menos $j = 1, 2, \dots$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C} - P = 30 \text{ kPa}$					
Fuente	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F - estadístico	p-Valor
Falta de ajuste	6129376,20	1	6129376,20	1462,7200	9,4E-31
Réplicas	150854,26	36	4190,40		
Total	6280230,45	37			
Resultado:	Hipótesis nula rechazada				
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C} - P = 60 \text{ kPa}$					
Falta de ajuste	6116501,36	1	6116501,36	1451,8142	3,1E-28
Réplicas	134816,18	32	4213,01		
Total	6251317,54	33			
Resultado:	Hipótesis nula rechazada				
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C} - P = 90 \text{ kPa}$					
Falta de ajuste	6833714,52	1	6833714,52	2505,3930	1,91E-33
Réplicas	92738,46	34	2727,60		
Total	6926452,98	35			
Resultado:	Hipótesis nula rechazada				

Evaluación de los parámetros del modelo.

Prueba de hipótesis sobre la significancia en cada parámetro.

Hipótesis nula: $\beta_j=0$.

Hipótesis Alternativa: $\beta_j \neq 0$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA						
$\Delta T= 73^\circ\text{C}$ y $P = 30$ kPa						
<i>Parámetro</i>	<i>Valor estimado</i>	<i>Error estándar</i>	<i>t-Estadístico</i>	<i>p-Valor</i>	<i>Intervalo de confianza</i>	
Fo	5,48	0,49	11,28	0,0000	4,49	6,46
Bi	814471,79	1,6E+10	5,1E-05	0,5000	-3,26E+10	3,26E+10
$\Delta T= 73^\circ\text{C}$ y $P = 60$ kPa						
Fo	4,88	0,45	10,73	1,99E-12	3,95	5,80
Bi	1081330,4	3,14E+10	3,45E-05	0,5000	-6,39E+10	6,39E+10
$\Delta T= 73^\circ\text{C}$ y $P = 90$ kPa						
Fo	3,75	0,26	14,45	2,22E-16	3,22	4,27
Bi	1078033,4	2,2E+10	4,87E-05	0,5000	-4,50E+10	4,50E+10

6.10. ANEXO 10

VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL MODELAMIENTO DE LA ABSORCIÓN DE ACEITE.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MODELO PARA $\Delta T = 53^\circ\text{C}$

$$\text{Modelo matemático. } M_f(t) = \beta_0 + \frac{\beta_1 t}{\beta_2 + t}$$

Se añadió una constante con el fin de evaluar su impacto en el modelo.

Evaluación de la capacidad de ajuste.

Prueba de hipótesis sobre la significancia del modelo frente a un valor constante.

Hipótesis nula: $\beta = 0$. Hipótesis Alternativa: $\beta \neq 0$ para al menos un $j = 1, 2, \dots$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
$\Delta T= 53^{\circ}\text{C}$ y $P = 30 \text{ kPa}$					
Fuente	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F - estadístico	p-Valor
Falta de ajuste	178747,06	2	89373,53	92,67	4,9E-17
Réplicas	45328,23	47	964,43		
Total	224075,30	49			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				
$\Delta T= 53^{\circ}\text{C}$ y $P = 60 \text{ kPa}$					
Falta de ajuste	120053,07	2,00	60026,54	28,00	9,8E-09
Réplicas	100764,12	47,00	2143,92		
Total	220817,19	49,00			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				
$\Delta T= 53^{\circ}\text{C}$ y $P = 90 \text{ kPa}$					
Falta de ajuste	84233,16	2,00	42116,58	30,91	2,7E-09
Réplicas	64030,71	47,00	1362,36		
Total	148263,88	49,00			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

Evaluación de los parámetros del modelo.

Prueba de hipótesis sobre la significancia en cada parámetro.

Hipótesis nula: $\beta_j=0$.

Hipótesis Alternativa: $\beta_j \neq 0$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA						
$\Delta T= 53^{\circ}\text{C}$ y $P = 30 \text{ kPa}$						
Parámetro	Valor estimado	Error estándar	t-Estadístico	p-Valor	Intervalo de confianza	
β_0	18,84	21,74	0,87	0,20	-24,89	62,57
β_1	293,03	22,18	13,21	0,00	248,41	337,65
β_2	15,89	3,97	4,01	0,00	7,91	23,88
$\Delta T= 53^{\circ}\text{C}$ y $P = 60 \text{ kPa}$						
β_0	14,00	32,67	0,43	0,34	-51,72	79,73
β_1	248,30	33,65	7,38	0,00	180,60	316,00
β_2	9,14	4,56	2,01	0,03	-0,03	18,30
$\Delta T= 53^{\circ}\text{C}$ y $P = 90 \text{ kPa}$						
β_0	9,19	26,09	0,35	0,36	-43,31	61,68
β_1	212,03	26,99	7,86	0,00	157,73	266,32
β_2	4,24	2,84	1,50	0,07	-1,46	9,95

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MODELO PARA $\Delta T= 73^{\circ}\text{C}$

$$\text{Modelo matemático. } M_f(t) = \beta_0 + \frac{\beta_1 t}{\beta_2 + t}$$

Se añadió una constante con el fin de evaluar su impacto en el modelo.

Evaluación de la capacidad de ajuste.

Prueba de hipótesis sobre la significancia del modelo frente a un valor constante.

Hipótesis nula: $\beta = 0$. Hipótesis Alternativa: $\beta \neq 0$ para al menos un $j = 1, 2, \dots$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
$\Delta T= 73^{\circ}\text{C}$ $P= 30 \text{ kPa}$					
Fuente	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F - estadístico	p-Valor
Falta de ajuste	157542,79	2,00	78771,40	33,18	6,3E-07
Réplicas	45106,89	19,00	2374,05		
Total	202649,68	21,00			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
$\Delta T= 73^{\circ}\text{C}$ P= 60 kPa					
Falta de ajuste	135580,61	2,00	67790,31	40,62	8,82E-07
Réplicas	25032,89	15,00	1668,86		
Total	160613,50	17,00			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				
$\Delta T= 73^{\circ}\text{C}$ P= 90 kPa					
Falta de ajuste	103902,35	2,00	51951,17	20,47	2,98E-05
Réplicas	43151,60	17,00	2538,33		
Total	147053,94	19,00			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

Evaluación de los parámetros del modelo

Prueba de hipótesis sobre la significancia en cada parámetro.

Hipótesis nula: $\beta = 0$.

Hipótesis Alternativa: $\beta \neq 0$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA						
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$ $P = 30 \text{ kPa}$						
Parámetro	Valor estimado	Error estándar	t-Estadístico	p-Valor	Intervalo de confianza	
β_0	12,35	34,44	0,36	0,36	-59,74	84,44
β_1	313,45	39,05	8,03	0,00	231,72	395,17
β_2	11,13	6,89	1,61	0,06	-3,30	25,56
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$ $P = 60 \text{ kPa}$						
β_0	23,88	28,43	0,84	0,21	-36,72	84,48
β_1	333,70	39,65	8,42	0,00	249,18	418,22
β_2	49,48	20,07	2,47	0,01	6,71	92,26
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$ $P = 90 \text{ kPa}$						
β_0	16,98	35,49	0,48	0,32	-57,89	91,85
β_1	268,92	42,80	6,28	0,00	178,61	359,22
β_2	26,85	15,79	1,70	0,05	-6,46	60,16

6.11. ANEXO 11

VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL MODELAMIENTO DE LA TEXTURA: FRAGILIDAD.

Modelo .

Modelo propuesto.

$$F = \frac{t}{\beta_1 + \beta_2 t + \beta_3 t^2}$$

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MODELO PARA $\Delta T = 53^\circ\text{C}$

Se añadió una constante con el fin de evaluar su impacto en el modelo.

Evaluación de la capacidad de ajuste.

Prueba de hipótesis sobre la significancia del modelo frente a un valor constante.

Hipótesis nula: $\beta = 0$. Hipótesis Alternativa: $\beta \neq 0$ para al menos un $j = 1, 2, \dots$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
ΔT= 53°C y P = 30 kPa					
Fuente	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F - estadístico	p-Valor
Falta de ajuste	1697,21	2	848,60	130,59	7,80E-37
Réplicas	1280,11	197	6,50		
Total	2977,32	199			
Resultado	hipótesis nula rechazada.				
ΔT= 53°C y P = 60 kPa					
Falta de ajuste	11427,87	2	5713,94	213,872	4,25E-50
Réplicas	5263,17	197	26,72		
Total	16691,04	199			
Resultado	hipótesis nula rechazada.				
ΔT= 53°C y P = 90 kPa					
Falta de ajuste	13775,90	2	6887,95	328,01	2,0E-63
Réplicas	4136,89	197	21,00		
Total	17912,79	199			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

Evaluación de los parámetros del modelo.

Prueba de hipótesis sobre la significancia en cada parámetro.

Hipótesis nula: $\beta_j=0$.

Hipótesis Alternativa: $\beta_j \neq 0$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA						
$\Delta T= 53^{\circ}\text{C}$ y $P = 30 \text{ kPa}$						
Parámetro	Valor estimado	Error estándar	t-Estadístico	p-Valor	Intervalo de confianza	
β_1	77,64	12,59	6,17	1,9E-09	52,82	102,46
β_2	-0,50	0,11	4,71	2,4E-06	-0,71	-0,29
β_3	0,0013	0,0002	5,69	2,3E-08	0,0008	0,0017
$\Delta T= 53^{\circ}\text{C}$ y $P = 60 \text{ kPa}$						
β_1	35,59	4,57	7,78	2,0E-13	26,5671	44,6092
β_2	-0,18	0,03	5,70	2,2E-08	-0,2438	-0,1184
β_3	0,0004	5E-05	6,79	6,6E-11	0,0003	0,0005
$\Delta T= 53^{\circ}\text{C}$ y $P = 90 \text{ kPa}$						
β_1	53,90	5,91	9,12	0	42,25	65,56
β_2	-0,26	0,04	7,08	1,24E-11	-0,33	-0,18
β_3	0,0004	5,34E-05	7,69	3,43E-13	0,0003	0,0005

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MODELO PARA $\Delta T= 73^{\circ}\text{C}$

Se añadió una constante con el fin de evaluar su impacto en el modelo.

Evaluación de la capacidad de ajuste.

Prueba de hipótesis sobre la significancia del modelo frente a un valor constante.

Hipótesis nula: $\beta = 0$. Hipótesis Alternativa: $\beta \neq 0$ para al menos un $j = 1, 2, \dots$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
$\Delta T= 73^{\circ}\text{C}$ $P= 30 \text{ kPa}$					
Fuente	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F - estadístico	p-Valor
Falta de ajuste	1277,6	2	638,8	111,1	5,5E-30
Réplicas	833,7	145	5,7		
Total	2111,4	147			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

$\Delta T= 73^{\circ}\text{C}$ $P= 60 \text{ kPa}$					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F - estadístico</i>	<i>p-Valor</i>
Falta de ajuste	6125,7	2	3062,9	138,9	2,73E-33
Réplicas	2933,6	133	22,1		
Total	9059,4	135			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				
$\Delta T= 73^{\circ}\text{C}$ $P= 90 \text{ kPa}$					
Falta de ajuste	8856,7	2	4428,4	138,9	1,10E-33
Réplicas	4367,5	137	31,9		
Total	13224,3	139			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

Evaluación de los parámetros del modelo

Prueba de hipótesis sobre la significancia en cada parámetro.

Hipótesis nula: $\beta = 0$.

Hipótesis Alternativa: $\beta \neq 0$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA						
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$ $P = 30$ kPa						
Parámetro	Valor estimado	Error estándar	t-Estadístico	p-Valor	Intervalo de confianza	
β_1	18,94	3,10	6,10	4,5E-09	12,81	25,07
β_2	-0,11	0,04	3,26	6,9E-04	-0,18	-0,05
β_3	6E-4	9,3E-05	6,6761	2,4E-10	4E-4	8E-4
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$ $P = 60$ kPa						
β_1	23,50	3,89	6,04	7,1E-09	15,81	31,19
β_2	-0,21	0,04	5,01	8,7E-07	-0,29	-0,13
β_3	7E-04	0,0001	6,65	3,5E-10	5E-4	9E-4
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$ $P = 90$ kPa						
β_1	19,06	3,91	4,88	1,4E-06	11,34	26,79
β_2	-0,07	0,03	2,53	6,3E-03	-0,13	-0,02
β_3	2.0E-04	5,4E-05	3,75	1,3E-04	9.6E-5	3.1E-4

6.12. ANEXO 12

VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DEL MODELAMIENTO DE LAS COORDENADAS DE COLOR

COORDENADA DE COLOR L*.

Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 53^\circ\text{C}$

Evaluación de la capacidad de ajuste.

$$\text{Color} = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$$

Prueba de hipótesis sobre la significancia del modelo frente a un valor constante

Hipótesis nula: $\beta = 0$. Hipótesis alterna: $\beta \neq 0$ para al menos un $j = 1, 2, 3, \dots$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}.$ P= 30 kPa					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F - estadístico</i>	<i>p-Valor</i>
Falta de ajuste	226,0	2	112,98	7,4122	7,9E-04
Réplicas	3002,8	197	15,24		
Total	3228,8	199			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}.$ P= 60 kPa					
Falta de ajuste	404,19	2	202,10	6,7321	1,49E-03
Réplicas	5913,93	197	30,02		
Total	6318,12	199			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}.$ P= 90 kPa					
Falta de ajuste	3547,23	2	1773,62	97,3512	3,97E-30
Réplicas	3589,09	197	18,22		
Total	7136,32	199			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

Evaluación de los parámetros del modelo.

Prueba de hipótesis sobre la significancia de cada parámetro.

Hipótesis nula: $\beta_j=0$.

Hipótesis alterna: $\beta_j \neq 0$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA						
$\Delta T = 53^\circ\text{C} \quad P= 30 \text{ kPa}$						
<i>Parámetro</i>	<i>Valor estimado</i>	<i>Error estándar</i>	<i>t- Estadístico</i>	<i>p-Valor</i>	<i>Intervalo de confianza</i>	
β_0	54,82	0,68	80,19	0,0E+00	53,47	56,17
β_1	-0,01	0,01	-1,39	9,2E-01	-0,02	0,001
β_2	0,00	0,00	0,45	3,3E-01	-1,9E-05	2,9E-05
$\Delta T = 53^\circ\text{C} \quad P= 60 \text{ kPa}$						
β_0	50,22	0,95	52,87	0,00	48,35	52,10
β_1	0,04	0,01	4,51	0,00	0,02	0,06
β_2	-8,0E-05	1,7E-05	-4,7E+00	1,0E+00	-1,1E-04	-4,6E-05
$\Delta T = 53^\circ\text{C} \quad P= 90 \text{ kPa}$						
β_0	52,89	0,73	72,00	0,00	51,44	54,34
β_1	0,04	0,01	5,71	0,00	0,03	0,05
β_2	-7,0E-05	1,3E-05	-5,4E+00	1,0E+00	-9,6E-05	-4,4E-05

Análisis estadístico del modelo para $\Delta T= 73^\circ\text{C}$

Prueba de hipótesis sobre la significancia del modelo frente a un valor constante

Hipótesis nula: $\beta=0$.

Hipótesis alterna: $\beta \neq 0$ para al menos un $j= 1,2,3...$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
$\Delta T = 73^\circ\text{C} \quad P= 30 \text{ kPa}$					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F - estadístico</i>	<i>p-Valor</i>
Falta de ajuste	312,55	2	156,28	7,36	9,06E-04
Réplicas	3080,59	145	21,25		
Total	3393,14	147			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}.$ P= 60 kPa					
Falta de ajuste	764,89	2	382,45	12,65	9,33E-06
Réplicas	4020,30	133	30,23		
Total	4785,19	135			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}.$ P= 90 kPa					
Falta de ajuste	2456,98	2	1228,49	57,9	6,1E-19
Réplicas	2908,92	137	21,23		
Total	5365,90	139			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

Evaluación de los parámetros del modelo.

Prueba de hipótesis sobre la significancia de cada parámetro.

Hipótesis nula: $\beta_j = 0$.

Hipótesis alterna: $\beta_j \neq 0$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA						
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$. $P = 30 \text{ kPa}$						
<i>Parámetro</i>	<i>Valor estimado</i>	<i>Error estándar</i>	<i>t- Estadístico</i>	<i>p-Valor</i>	<i>Intervalo de confianza</i>	
β_0	51,45	0,61	84,20	0,00	50,25	52,66
β_1	0,01	0,01	0,95	0,17	-0,01	0,02
β_2	-3,2E-05	1,4E-05	-2,33	0,99	-6E-05	-4,9E-6
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$. $P = 60 \text{ kPa}$						
β_0	57,61	1,12	51,27	0,00	55,39	59,83
β_1	5,83E-05	1,45E-02	4,01E-03	0,50	-0,03	0,03
β_2	-5,09E-05	3,88E-05	-1,31E+00	0,90	-1,2E-04	2,6E-05
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$. $P = 90 \text{ kPa}$						
β_0	59,69	0,89	66,83	0,00	57,92	61,46
β_1	2,04E-02	8,81E-03	2,32	0,01	0,003	0,038
β_2	-0,0001	1,84E-05	-5,44	1,00E+00	-1,4E-04	-6,4E-05

COORDENADA DE COLOR a^* .

Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 53^\circ\text{C}$

Evaluación de la capacidad de ajuste.

$$\text{Color} = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$$

Prueba de hipótesis sobre la significancia del modelo frente a un valor constante

Hipótesis nula: $\beta = 0$. Hipótesis alterna: $\beta \neq 0$ para al menos un $j = 1, 2, 3, \dots$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}.$ P= 30 kPa					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F - estadístico</i>	<i>p-Valor</i>
Falta de ajuste	42,3	2	21,1	8,3	3,62E-04
Réplicas	504,9	197	2,56		
Total	547,2	199			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}.$ P= 60 kPa					
Falta de ajuste	47,3	2	23,7	10,7	3,7E-05
Réplicas	433,8	197	2,20		
Total	481,12	199			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}.$ P= 90 kPa					
Falta de ajuste	229,2	2	114,6	79,7	4,5E-26
Réplicas	283,4	197	1,44		
Total	512,64	199			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

Evaluación de los parámetros del modelo.

Prueba de hipótesis sobre la significancia de cada parámetro.

Hipótesis nula: $\beta_j = 0$.

Hipótesis alterna: $\beta_j \neq 0$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA						
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$. $P = 30 \text{ kPa}$						
<i>Parámetro</i>	<i>Valor estimado</i>	<i>Error estándar</i>	<i>t- Estadístico</i>	<i>p-Valor</i>	<i>Intervalo de confianza</i>	
β_0	7,50	0,29	26,11	0,00	6,94	8,07
β_1	0,005	0,003	1,78	0,04	0,00	0,01
β_2	-3,4E-06	5,1E-06	-6,6E-01	7,4E-01	-1,3E-05	6,7E-06
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$. $P = 60 \text{ kPa}$						
β_0	10,31	0,25	41,01	0,00	9,82	10,81
β_1	-3.1E-04	0,0023	-0,13	0,55	-4.9E-03	4.3E-03
β_2	5,7E-06	4,5E-06	1,3E+00	0,1020	-3,1E-06	1,5E-05
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$. $P = 90 \text{ kPa}$						
β_0	10,06	0,21	46,91	0,00	9,64	10,49
β_1	2,3E-03	2,0E-03	1,16E+00	0,12	-1,6E-03	6,3E-03
β_2	6,11E-06	3,82E-06	1,60E+00	5,57E-02	-1,4E-06	1,4E-05

Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$

Prueba de hipótesis sobre la significancia del modelo frente a un valor constante

Hipótesis nula: $\beta = 0$. Hipótesis alterna: $\beta \neq 0$ para al menos un $j = 1, 2, 3, \dots$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$. $P = 30 \text{ kPa}$					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F - estadístico</i>	<i>p-Valor</i>
Falta de ajuste	-12,79	2	-6,39	-3,65	0,0E+00
Réplicas	254,22	145	1,75		
Total	241,43	147			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

$\Delta T = 73^{\circ}\text{C.} \quad P= 60 \text{ kPa}$					
Falta de ajuste	27,01	2	13,51	7,7	6,8E-04
Réplicas	233,26	133	1,75		
Total	260,27	135			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C.} \quad P= 90 \text{ kPa}$					
Falta de ajuste	313,86	2	156,93	87,4	3,5E-25
Réplicas	246,04	137	1,80		
Total	559,90	139			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

Evaluación de los parámetros del modelo.

Prueba de hipótesis sobre la significancia de cada parámetro.

Hipótesis nula: $\beta_j = 0$.

Hipótesis alterna: $\beta_j \neq 0$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA						
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$. $P = 30 \text{ kPa}$						
<i>Parámetro</i>	<i>Valor estimado</i>	<i>Error estándar</i>	<i>t- Estadístico</i>	<i>p-Valor</i>	<i>Intervalo de confianza</i>	
β_0	7,66	0,19	39,89	0,00	7,28	8,04
β_1	7,9E-03	2,0E-03	4,0E+00	5,7E-05	4,0E-03	1,2E-02
β_2	-8,7E-06	4,4E-06	-2,0E+00	9,8E-01	-1,7E-05	-2,5E-08
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$. $P = 60 \text{ kPa}$						
β_0	11,34	0,25	45,09	0,00	10,85	11,84
β_1	-1,2E-02	3,3E-03	-3,6E+00	1,0E+00	-1,8E-02	-5,4E-03
β_2	3,5E-05	8,7E-06	4,0E+00	5,6E-05	1,7E-05	5,2E-05
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$. $P = 90 \text{ kPa}$						
β_0	9,95	0,26	38,52	0,00	9,44	10,46
β_1	8,8E-03	2,5E-03	3,4E+00	3,9E-04	3,7E-03	1,4E-02
β_2	4,9E-06	5,3E-06	9,3E-01	1,8E-01	-5,6E-06	1,5E-05

COORDENADA DE COLOR b^* .

Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 53^\circ\text{C}$

Evaluación de la capacidad de ajuste.

$$\text{Color} = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$$

Prueba de hipótesis sobre la significancia del modelo frente a un valor constante

Hipótesis nula: $\beta = 0$. Hipótesis alterna: $\beta \neq 0$ para al menos un $j = 1, 2, 3, \dots$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$. P= 30 kPa					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F - estadístico</i>	<i>p-Valor</i>
Falta de ajuste	6267,1	2	3133,55	207,02	3,78E-49
Réplicas	2981,9	197	15,14		
Total	9249,0	199			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$. P= 60 kPa					
Falta de ajuste	9821,70	2	4910,85	167,88	2,77E-43
Réplicas	5762,75	197	29,25		
Total	15584,46	199			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				
$\Delta T = 53^{\circ}\text{C}$. P= 90 kPa					
Falta de ajuste	10650,56	2	5325,28	247,58	1,76E-54
Réplicas	4237,35	197	21,51		
Total	14887,90	199			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

Evaluación de los parámetros del modelo.

Prueba de hipótesis sobre la significancia de cada parámetro.

Hipótesis nula: $\beta_j=0$.

Hipótesis alterna: $\beta_j \neq 0$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA						
$\Delta T = 53^\circ\text{C} \cdot P = 30 \text{ kPa}$						
<i>Parámetro</i>	<i>Valor estimado</i>	<i>Error estándar</i>	<i>t-Estadístico</i>	<i>p-Valor</i>	<i>Intervalo de confianza</i>	
β_0	21,18	0,66	32,29	0,00	19,89	22,47
β_1	8,2E-02	6,1E-03	1,3E+01	0,0E+00	7,0E-02	9,5E-02
β_2	-9,1E-05	1,2E-05	-7,8E+00	1,0E+00	-1,1E-04	-6,8E-05
$\Delta T = 53^\circ\text{C} \cdot P = 60 \text{ kPa}$						
β_0	22,51	0,92	24,38	0,00	20,69	24,33
β_1	1,6E-01	8,6E-03	1,8E+01	0,0E+00	1,4E-01	1,7E-01
β_2	-2,5E-04	1,6E-05	-1,5E+01	1,0E+00	-2,8E-04	-2,2E-04
$\Delta T = 53^\circ\text{C} \cdot P = 90 \text{ kPa}$						
β_0	29,38	0,81	36,45	0,00	27,79	30,97
β_1	1,4E-01	7,5E-03	1,8E+01	0,0E+00	1,2E-01	1,5E-01
β_2	-2,1E-04	1,4E-05	-1,4E+01	1,0E+00	-2,3E-04	-1,8E-04

Análisis estadístico del modelo para $\Delta T = 73^\circ\text{C}$

Evaluación de la capacidad de ajuste.

Prueba de hipótesis sobre la significancia del modelo frente a un valor constante

Hipótesis nula: $\beta=0$.

Hipótesis alterna: $\beta \neq 0$ para al menos un $j = 1, 2, 3, \dots$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
$\Delta T = 73^\circ\text{C} \cdot P = 30 \text{ kPa}$					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F - estadístico</i>	<i>p-Valor</i>
Falta de ajuste	4735,50	2	2367,75	166,67	2,62E-38
Réplicas	2059,87	145	14,21		
Total	6795,36	147			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

$\Delta T = 73^{\circ}\text{C.} \quad P = 60 \text{ kPa}$					
Falta de ajuste	3717,95	2	1858,98	62,35	7,89E-20
Réplicas	3965,50	133	29,82		
Total	7683,46	135			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C.} \quad P = 90 \text{ kPa}$					
Falta de ajuste	5093,90	2	2546,95	111,29	2,0E-29
Réplicas	3135,43	137	22,89		
Total	8229,32	139			
Resultado	Hipótesis nula rechazada.				

Evaluación de los parámetros del modelo.

Prueba de hipótesis sobre la significancia de cada parámetro.

Hipótesis nula: $\beta_j = 0$.

Hipótesis alterna: $\beta_j \neq 0$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA						
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$. $P = 30 \text{ kPa}$						
<i>Parámetro</i>	<i>Valor estimado</i>	<i>Error estándar</i>	<i>t- Estadístico</i>	<i>p-Valor</i>	<i>Intervalo de confianza</i>	
β_0	21,71	0,75	28,94	0,00	20,22	23,19
β_1	0,109	0,008	14,052	0,000	0,094	0,125
β_2	-1,78E-04	1,71E-05	-1,04E+01	1,00E+00	-2,1E-04	-1,4E-04
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$. $P = 60 \text{ kPa}$						
β_0	29,59	0,99	29,91	0,00	27,63	31,55
β_1	1,6E-01	1,3E-02	1,3E+01	0,0E+00	1,4E-01	1,9E-01
β_2	-3,6E-04	3,4E-05	-1,1E+01	1,0E+00	-4,3E-04	-2,9E-04
$\Delta T = 73^{\circ}\text{C}$. $P = 90 \text{ kPa}$						
β_0	33,59	0,89	37,72	0,00	31,83	35,35
β_1	1,3E-01	8,8E-03	1,5E+01	0,0E+00	1,1E-01	1,5E-01
β_2	-2,8E-04	1,8E-05	-1,5E+01	1,0E+00	-3,2E-04	-2,4E-04

6.13. ANEXO 13

VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS SUPERFICIES DE RESPUESTA.

Evaluación de la capacidad de ajuste.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2$$

Prueba de hipótesis sobre la significancia del modelo de superficie de respuesta.

Hipótesis nula: $b=0$. Hipótesis alterna: $b \neq 0$ para al menos un $j= 1,2,3...$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
Contenido final de humedad					
<i>Fuente de variación</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de Libertad</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>F - estadístico</i>	<i>p-Valor</i>
Regresión	2603,83	9,00	289,31	21,12	2,3E-05
Residual	136,99	10,00	13,70		
Total	2740,83	19,00			
El coeficiente de correlación (R²)			0.95		
Resultado:			Hipótesis nula rechazada		
Contenido final de aceite.					
Regresión	326,57	9,00	36,29	4,48	0,01
Residual	81,00	10,00	8,10		
Total	407,57	19,00			
El coeficiente de correlación (R²)			0.80		
Resultado:			Hipótesis nula rechazada		
Textura : Fragilidad					
Regresión	735,91	9,00	81,77	7,36	2,2E-03
Residual	111,17	10,00	11,12		
Total	847,08	19,00			
El coeficiente de correlación (R²)			0.87		
Resultado:			Hipótesis nula rechazada		
Color L*					
Regresión	616,4762	9	68,50	13,81	1,6E-04
Residual	49,6058	10	4,96		
Total	666,0820	19			
El coeficiente de correlación (R²)			0.93		
Resultado:			Hipótesis nula rechazada		

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA					
Color a*					
Regresión	35,19	9	3,91	2,34	1,0E-01
Residual	16,68	10	1,67		
Total	51,87	19			
El coeficiente de correlación (R²)			0.68		
Resultado:			Hipótesis nula aceptada		
Color b*					
Regresión	1014,44	9	112,72	11,36	0,0004
Residual	99,22	10	9,92		
Total	1113,67	19			
El coeficiente de correlación (R²)			0.91		
Resultado:			Hipótesis nula rechazada		

Evaluación de los efectos del modelo de superficie de respuesta.

Prueba de hipótesis sobre la significancia de cada efecto.

Hipótesis nula: $b_j=0$.

Hipótesis alterna: $b_j \neq 0$

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA							
Contenido final de Humedad							
<i>Parámetro</i>	<i>Efecto</i>	<i>Valor estimado</i>	<i>Error estándar</i>	<i>t- Estadístico</i>	<i>p-Valor</i>	<i>Intervalo de confianza</i>	
b ₀	Constante	97,62	21,73	4,49	0,00	49,21	146,03
b ₁	ΔT	-1,50	0,39	3,86	0,00	-2,36	-0,63
b ₂	P	0,01	0,42	0,02	0,49	-0,92	0,93
b ₃	t	-13,81	2,40	5,76	0,00	-19,15	-8,47
b ₄	$\Delta T \cdot P$	0,00	0,00	0,96	0,18	0,00	0,01
b ₅	$\Delta T \cdot t$	0,06	0,02	2,75	0,01	0,01	0,11
b ₆	$P \cdot t$	-0,04	0,02	1,61	0,07	-0,10	0,02
b ₇	$(\Delta T)^2$	0,01	0,00	2,36	0,02	0,00	0,01
b ₈	P ²	0,00	0,00	0,31	0,38	-0,01	0,01
b ₉	t ²	0,84	0,12	6,88	0,00	0,57	1,11

TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA							
Contenido final de aceite							
<i>Parámetro</i>	<i>Efecto</i>	<i>Valor estimado</i>	<i>Error estándar</i>	<i>t- Estadístico</i>	<i>p-Valor</i>	<i>Intervalo de confianza</i>	
b ₀	Constante	41,61	16,71	2,49	0,02	4,38	78,83
b ₁	ΔT	-0,44	0,30	1,47	0,09	-1,10	0,23
b ₂	P	-0,18	0,32	0,55	0,30	-0,89	0,54
b ₃	t	-0,92	1,84	0,50	0,31	-5,02	3,19
b ₄	$\Delta T * P$	0,00	0,00	1,63	0,07	0,00	0,01
b ₅	$\Delta T * t$	0,02	0,02	1,30	0,11	-0,02	0,06
b ₆	$P * t$	0,02	0,02	1,01	0,17	-0,02	0,06
b ₇	$(\Delta T)^2$	0,00	0,00	0,91	0,19	0,00	0,01
b ₈	P ²	0,00	0,00	0,97	0,18	-0,01	0,00
b ₉	t ²	-0,05	0,09	0,50	0,31	-0,26	0,16
Textura : Fragilidad							
b ₀	Constante	-33,47	19,57	1,71	0,06	-77,08	10,14
b ₁	ΔT	0,74	0,35	2,13	0,03	-0,03	1,52
b ₂	P	-0,13	0,37	0,34	0,37	-0,96	0,71
b ₃	t	7,29	2,16	3,37	0,00	2,48	12,10
b ₄	$\Delta T * P$	0,00	0,00	1,46	0,09	-0,01	0,00
b ₅	$\Delta T * t$	-0,10	0,02	4,76	0,00	-0,14	-0,05
b ₆	$P * t$	0,04	0,02	1,91	0,04	-0,01	0,09
b ₇	$(\Delta T)^2$	0,00	0,00	0,03	0,49	0,00	0,00
b ₈	P ²	0,00	0,00	1,32	0,11	0,00	0,01
b ₉	t ²	-0,21	0,11	1,94	0,04	-0,46	0,03

Color L*							
TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA							
<i>Parámetro</i>	<i>Efecto</i>	<i>Valor estimado</i>	<i>Error estándar</i>	<i>t- Estadístico</i>	<i>p-Valor</i>	<i>Intervalo de confianza</i>	
b ₀	Constante	-31,82	13,08	2,43	0,02	-60,96	-2,69
b ₁	ΔT	1,31	0,23	5,59	0,00	0,79	1,83
b ₂	P	0,84	0,25	3,37	0,00	0,29	1,40
b ₃	t	8,96	1,44	6,21	0,00	5,74	12,17
b ₄	$\Delta T * P$	-0,01	0,00	2,78	0,01	-0,01	0,00
b ₅	$\Delta T * t$	-0,07	0,01	5,43	0,00	-0,11	-0,04
b ₆	$P * t$	-0,05	0,01	3,07	0,01	-0,08	-0,01
b ₇	$(\Delta T)^2$	-0,01	0,00	3,69	0,00	-0,01	0,00
b ₈	P ²	0,00	0,00	0,22	0,41	0,00	0,00
b ₉	t ²	-0,23	0,07	3,14	0,01	-0,39	-0,07
Color a*							
b ₀	Constante	15,59	7,58	2,06	0,03	-1,31	32,48
b ₁	ΔT	-0,30	0,14	2,25	0,02	-0,61	0,00
b ₂	P	0,17	0,14	1,14	0,14	-0,16	0,49
b ₃	t	-0,85	0,84	1,02	0,17	-2,72	1,01
b ₄	$\Delta T * P$	0,00	0,00	0,33	0,37	0,00	0,00
b ₅	$\Delta T * t$	0,02	0,01	1,91	0,04	0,00	0,03
b ₆	$P * t$	0,00	0,01	0,44	0,33	-0,02	0,02
b ₇	$(\Delta T)^2$	0,00	0,00	2,30	0,02	0,00	0,00
b ₈	P ²	0,00	0,00	1,24	0,12	0,00	0,00
b ₉	t ²	0,02	0,04	0,42	0,34	-0,08	0,11

Color b*							
TABLA DEL ANÁLISIS DE VARIANZA							
<i>Parámetro</i>	<i>Efecto</i>	<i>Valor estimado</i>	<i>Error estándar</i>	<i>t- Estadístico</i>	<i>p-Valor</i>	<i>Intervalo de confianza</i>	
b ₀	Constante	-92,85	18,49	5,02	0,00	-134,05	-51,64
b ₁	ΔT	1,88	0,33	5,67	0,00	1,14	2,61
b ₂	P	1,18	0,35	3,35	0,00	0,40	1,97
b ₃	t	16,68	2,04	8,18	0,00	12,14	21,23
b ₄	$\Delta T \cdot P$	-0,01	0,00	2,26	0,02	-0,01	0,00
b ₅	$\Delta T \cdot t$	-0,11	0,02	5,52	0,00	-0,15	-0,06
b ₆	$P \cdot t$	-0,06	0,02	3,03	0,01	-0,11	-0,02
b ₇	$(\Delta T)^2$	-0,01	0,00	3,62	0,00	-0,01	0,00
b ₈	P ²	0,00	0,00	0,89	0,20	-0,01	0,00
b ₉	t ²	-0,58	0,10	5,58	0,00	-0,81	-0,35

Optimización de la superficie de respuesta.

Contenido final de humedad					
Matriz Hessiana			Eigenvalores	Punto estacionario	
0,0057	0,0017	0,0316	-0,0007	Tipo	Silla
0,0017	0,0009	-0,0200	0,0057	ΔT [°C]	46,78
0,0316	-0,0200	0,8379	0,8396	P [kPa]	113,08
				t [min]	9,18
Contenido final de aceite					
0,0017	0,0022	0,0115	-0,0512	Tipo	Silla
0,0022	-0,0021	0,0096	-0,0029	ΔT [°C]	41,06
0,0115	0,0096	-0,0470	0,0067	P [kPa]	31,94
				t [min]	6,81
Textura : Fragilidad					
7,1E-05	-2,3E-03	-4,9E-02	-0,2256	Tipo	Silla
-2,3E-03	3,4E-03	2,1E-02	0,0006	ΔT [°C]	37,84
-4,9E-02	2,1E-02	-2,1E-01	0,0155	P [kPa]	-5,05
				t [min]	7,86

Color L*					
Matriz Hessiana			Eigenvalores	Punto estacionario	
-0,0054	-0,0030	-0,0375	-0,2385	Tipo	Silla
-0,0030	-0,0004	-0,0229	0,0003	ΔT [°C]	174,50
-0,0375	-0,0229	-0,2301	0,0022	P [kPa]	-58,36
				t [min]	-3,14
Color a*					
0,0020	0,0002	0,0077	-0,0022	Tipo	Silla
0,0002	-0,0012	-0,0019	-0,0003	ΔT [°C]	93,94
0,0077	-0,0019	0,0178	0,0210	P [kPa]	93,12
				t [min]	-6,52
Color b*					
-0,0075	-0,0034	-0,0539	-0,5846	Tipo	Máximo.
-0,0034	-0,0022	-0,0320	-0,0025	ΔT [°C]	9,58
-0,0539	-0,0320	-0,5778	-0,0003	P [kPa]	332,18
				t [min]	-4,86

OPTIMIZACIÓN GENERAL

Para este punto se usaron las variables de salida que presentaron un coeficiente de correlación > 0.87 .

Solución local

Fuerza térmica equivalente = 57.3652 °C.

Presión absoluta = 72.7046 kPa y Tiempo = 6.13960 minutos.

Respuestas pronosticadas

VARIABLE DE SALIDA	VALOR PRONOSTICADO	CONVENIENCIA
Contenido de humedad	1.0059	0.999597
Coordenada de color L*	59.3926	0.719629
Coordenada de color b*	50.4906	0.896783
Coordenada de color C	51.6458	0.791145
Textura : Fragilidad	20.0005	0.999897
Coordenada de color H	78.1178	0.603928
Conveniencia compuesta (incluye todos las variables) = 0.888843		